



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΠΡΩΡΑΙΑΣ ΥΔΑΤΟΣΤΕΓΟΥΣ ΦΡΑΚΤΗΣ ΜΕ ΤΗ  
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

**STRENGTH ANALYSIS OF FOREPEAK WATERTIGHT BULKHEAD  
USING FINITE ELEMENT METHOD**

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Θ. ΓΚΛΙΑΤΗΣ

A.M. 51115016

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. Μηχ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΔΡΑΓΑΤΟΓΙΑΝΝΗΣ

ΑΘΗΝΑ, 2023



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ**

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΓΚΛΙΑΤΗΣ  
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 51115016

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ :

ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΠΡΩΡΑΙΑΣ ΥΔΑΤΟΣΤΕΓΟΥΣ ΦΡΑΚΤΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ  
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

DIPLOMA THESIS TITLE:

STRENGTH ANALYSIS OF FOREPEAK WATERTIGHT BULKHEAD USING FINITE  
ELEMENT METHOD

ΣΥΓΓΡΑΦΗ : ΕΤΟΣ 2023

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΥΠΟΒΟΛΗΣ : 12/02/2024

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΞΕΤΑΣΗΣ : 11/01/2024

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :

Δρ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α. ΔΡΑΓΑΤΟΓΙΑΝΝΗΣ  
(Εντ. Διδάσκων)

Δρ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΘΕΟΔΟΥΛΙΔΗΣ  
(Επ. Καθηγητής)

Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΠΟΛΙΤΗΣ  
(Καθηγητής)

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Παναγιώτης Θεόδωρος Γκλιάτης του Σωτηρίου και της Ελένης, με αριθμό μητρώου 51115016 και φοιτητής του τμήματος ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ, δηλώνω υπεύθυνα ότι :

«Είμαι συγγραφέας της διπλωματικής εργασίας με τίτλο 'Μελέτη Αντοχής Πρωραίας Υδατοστεγούς Φρακτής με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων' και κάθε βοήθεια η οποία μου παρασχέθηκε για την εκπόνησή της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναγράφεται στην εργασία. Επιπρόσθετα, οι πηγές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη σαφήνεια, στην βιβλιογραφία της εργασίας. Τέλος, με πλήρη υπευθυνότητα βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί αποκλειστικά από εμένα και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας δικής μου και του Πανεπιστημίου.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών



.....

Γκλιάτης Παναγιώτης Θεόδωρος



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμότατα τον καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής μου κύριο Δρ. Μηχ. Δημήτριο Δραγατογιάννη για την πλήρη καθοδήγηση καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσε με συμβουλές και διορθώσεις με σκοπό την ορθή εκπόνηση και παρουσίαση της εργασίας. Η ανταπόκριση ήταν άμεση σε όποιες απορίες ή ερωτήσεις δημιουργήθηκαν.

Επίσης, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω το ναυπηγικό γραφείο NAP ENGINEERING P.C. (ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΠΡΑΤΙΚΑΚΗΣ Ι.Κ.Ε) για την στήριξη και την βοήθεια τους επιτρέποντάς μου πρόσβαση σε υλικό αναγκαίο για την υλοποίηση της διπλωματικής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη τους καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

A. ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	9
B. ABSTRACT .....	10
Γ. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	11
1. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ .....	13
1.1 ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΕΣ .....	13
1.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	13
1.1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	14
1.1.3 ΙACS ΚΑΙ ABS .....	14
1.2 ΤΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΦΡΑΚΤΗ .....	15
1.3 ΕΝΟΤΗΤΕΣ ABS .....	18
1.4 ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ .....	19
1.5 ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ .....	21
1.5.1 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΝΤΟΧΗΣ .....	21
1.5.2 ABS ΚΑΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	27
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	30
2.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ .....	30
2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ .....	30
2.1.2 ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ .....	31
2.1.3 ΤΑΣΗ VON MISES .....	33
2.2 ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ .....	34
2.3 ΚΑΜΨΗ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ .....	35
3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	36
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ .....	36
3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ .....	37
3.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ .....	38
3.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΠΣ .....	45
3.5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS .....	46
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	47
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΛΟΙΟΥ .....	47
4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΦΡΑΚΤΗΣ .....	49

4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	49
4.2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ.....	51
4.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΧΟΥΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ .....	52
4.2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΑΠΛΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ .....	55
4.2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥ .....	59
4.2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΠΛΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥ .....	62
4.2.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥ .....	65
4.2.8 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ 3D ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	68
4.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	69
4.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS .....	71
4.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	71
4.4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	72
4.4.3 ΑΠΟΤΕΜΕΣΜΑΤΑ .....	99
4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	108
Δ. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	109
Ε. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	110

## Α. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη της ναυπηγικής βιομηχανίας και ειδικότερα των ναυπηγικών κατασκευών βασίζεται σε διαχρονικές προσπάθειες που γίνονται από ναυπηγεία, τεχνικά γραφεία και ερευνητικά κέντρα, πάντα με την βοήθεια νέων τεχνικών σχεδιασμού και κατασκευής. Με τον τρόπο αυτό, ο ναυπηγικός κλάδος είναι ταχύτατα αναπτυσσόμενος και οι ανάγκες για εξέλιξη γίνονται ολοένα και πιο απαιτητικές. Ο ναυπηγικός κλάδος χαρακτηρίζεται από πλοία και πλωτές κατασκευές που επιτελούν σημαντικό έργο και αποτελούν την βάση της κοινωνίας που γνωρίζουμε σήμερα. Για τον λόγο αυτό, θα πρέπει η μελέτη και η κατασκευή τους να γίνεται μέσα σε αυστηρά πλαίσια. Τα πλαίσια αυτά καθορίζονται από τους κανονισμούς που εκδίδουν οι Νηογνώμονες σε διεθνές επίπεδο και κάθε μέλος της ναυπηγικής βιομηχανίας υποχρεούται να ακολουθεί και να τηρεί. Λόγω της αύξησης των απαιτήσεων, οι κατασκευές έγιναν πιο πολύπλοκες, πιο ογκώδης και ο χρόνος κατασκευής τους μειώθηκε αισθητά. Δεδομένων των παραγόντων αυτών, αναπτύχθηκαν κατάλληλα λογισμικά που εξυπηρετούν τις ανάγκες αυτές και εκσυγχρονίζουν τον κλάδο. Ο τομέας που αναπτύχθηκε ραγδαία είναι ο κατασκευαστικός και συνεπώς ο έλεγχος της κατασκευής σε διάφορες καταπονήσεις ήταν δεδομένο πως θα ακολουθήσει. Λόγω της διόγκωσης των κατασκευών, τα προβλήματα έγιναν πιο σύνθετα και δυσεπίλυτα, τα υλικά έγιναν ισχυρότερα και ο τρόπος κατασκευής άλλαξε αισθητά. Έπρεπε λοιπόν να υπάρξουν μέθοδοι υπολογισμού που να συνδυάζουν όλα τα παραπάνω και να μπορούν να αναλύσουν σύνθετες κατασκευές δίνοντας ακριβή αποτελέσματα. Αυτή που αναπτύχθηκε ήταν η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων και έμελλε να εισχωρήσει σχεδόν σε όλους τους τομείς της ναυπηγικής επιστήμης όπως ανάλυση αντοχής, υπολογιστική ρευστοδυναμική κ.α. Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μέθοδο αυτή μέσα από την ανάλυση μιας πρωραίας υδατοστεγούς φρακτής συγκρούσεως.

## **B. ABSTRACT**

The development of the shipbuilding industry is based on long-standing efforts made by shipyards, technical offices and research centres which always develop new design and construction techniques. In this way, shipbuilding industry is becoming a fast-growing sector and the need for development is augmented. Ships and floating structures are the main part of this sector and they do important work forming the basis of the society we know today. For this reason, design and construction must be carried out within a strict regulation framework. These are defined by classification societies internationally and every member of the shipbuilding industry has to follow and comply with. Due to requirements, structures have become more complex, more massive and the time of construction has been significantly reduced. As a result, appropriate software was developed. Specifically, programs that do strength analysis were developed. Due to bigger constructions, strength analysis problems became more difficult to deal with, materials became stronger and the way of construction changed significantly. Therefore, advanced calculation methods have to analyze complex structures giving accurate results. The Finite Element Method was the method which adopted in all sectors of shipbuilding industry such as solving strength analysis problems, computational fluid dynamics problems, etc. This thesis deals with this method through the analysis of a forepeak watertight collision bulkhead.

## Γ. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### Προσδιορισμός του προβλήματος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή και η μελέτη αντοχής της προωραίας υδατοστεγούς φρακτής συγκρούσεως ενός φορτηγού πλοίου το οποίο θα μεταφέρει στο κύτος του ειδικό εξοπλισμό επεξεργασίας έρματος και σωληνώσεις. Ερευνάται η αντοχή της φρακτής σε κάμψη και γίνεται μελέτη για τον προσδιορισμό των τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται σε αυτήν υπό ασκούμενη υδροστατική πίεση, είτε σε κατάσταση ερματισμού είτε σε κατάσταση κατάκλισης.

Το πλοίο αρχικά εκτελούσε περιβαλλοντικές εργασίες όπως καθαρισμό της επιφάνειας της θάλασσας από απορρίμματα. Για τον σκοπό αυτό διέθετε δύο πλαϊνά ανοίγματα στην πλώρη του για την εισαγωγή του θαλασσινού νερού και τον μετέπειτα καθαρισμό του και συνεπώς δεν διέθετε προωραία στεγανή φρακτή. Για την μετασκευή του σε φορτηγό, θα κατασκευαστεί μια νέα προωραία στεγανή φρακτή συγκρούσεως σύμφωνα με διεθνείς κανονισμούς και είναι αυτή που βρίσκεται υπό μελέτη.

Για την μελέτη και ανάλυση της προωραίας φρακτής θα χρησιμοποιηθεί η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων ή Finite Element Analysis (FEA) και συγκεκριμένα το λογισμικό ANSYS. Η χρήση του λογισμικού παρέχει την δυνατότητα υπολογισμού μετατοπίσεων και μηχανικών τάσεων που αναπτύσσονται μέσα στο υλικό. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται με την επίλυση κατάλληλων διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το αντίστοιχο φυσικό φαινόμενο ή ακόμα και συνδυασμό φαινομένων και οι οποίες δύσκολα επιλύονται με το χέρι. Το πρόγραμμα αναλύει το μοντέλο δημιουργώντας ένα πολύ πυκνό πλέγμα και ασκεί τα κατάλληλα φορτία που έχουν επιλεγεί, όπως η υδροστατική πίεση. Πριν γίνει η παραπάνω ανάλυση-μελέτη, θα πραγματοποιηθεί και έλεγχος αντοχής της φρακτής κάνοντας χρήση διαγραμμάτων, έτσι ώστε να δοθεί η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

Η δημιουργία του μοντέλου της προωραίας υδατοστεγούς φρακτής θα γίνει ακολουθώντας τους κανόνες του κατασκευαστικού σχεδίου και των Νηογνομόνων στους οποίους θα γίνει αναφορά στα πλαίσια της διπλωματικής. Αρχικά θα οριστούν κάποιες αρχικές διαστάσεις με βάση τους κανονισμούς και στην συνέχεια, αν τα αποτελέσματα δεν είναι τα επιθυμητά, θα γίνει η απαραίτητη βελτιστοποίηση. Το υλικό κατασκευής για τέτοιες εφαρμογές είναι ο ναυπηγικός χάλυβας, ενώ οι απαιτήσεις που τον διέπουν αναφέρονται στην παρούσα εργασία

Η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου της φρακτής δεν θα γίνει αυθαίρετα αλλά θα ακολουθηθούν οι κατάλληλοι κανονισμοί οι οποίοι ορίζονται από τις διατάξεις των Νηογνομόνων. Οι κανονισμοί δίνουν τις ελάχιστες απαιτούμενες διαστάσεις και το πάχος των μερών της κατασκευής χρησιμοποιώντας σχέσεις, πίνακες και διαγράμματα. Οι Νηογνώμονες είναι οι ρυθμιστικές αρχές-οργανισμοί που είναι αρμόδιοι για την έκδοση, επίβλεψη και θέσπιση των απαραίτητων κανονισμών ασφαλείας για οποιοδήποτε κατασκευαστικό ή λειτουργικό στοιχείο πλοίου ή πλωτής κατασκευής. Υπάρχουν πολλοί διεθνείς αναγνωρισμένοι Νηογνώμονες και κάθε ένας ακολουθεί την δική του φιλοσοφία, όμως όλοι θα πρέπει να οδηγούν σε παρόμοια αποτελέσματα. Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας, θα επιλεγθούν οι κανονισμοί του Αμερικανικού Νηογνώμονα ABS (American Bureau of Shipping) οι οποίοι είναι διεθνώς αποδεκτοί και εγκεκριμένοι.

Η εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων σε τέτοιου είδους μελέτες είναι καθοριστικής σημασίας διότι με βάση αυτά καθορίζεται η ασφάλεια των επιβαινόντων, του πλοίου και του περιβάλλοντος.

Οποιαδήποτε λανθασμένη εκτίμηση μπορεί να καταστεί μοιραία. Είναι εξίσου σημαντικό να αναφερθεί πως τέτοιου είδους μελέτες πραγματοποιούνται από ελάχιστα και πολύ συγκεκριμένα τεχνικά γραφεία καθώς και από ορισμένους Νηογνώμονες που διαθέτουν την τεχνογνωσία και το προσωπικό. Το γεγονός αυτό από μόνο του καθιστά πρόκληση, σε προπτυχιακό επίπεδο, την εξαγωγή σωστών αποτελεσμάτων στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας λόγω της ιδιαίτερα απαιτητικής φύσης του αντικειμένου.

Όσον αφορά το θεωρητικό υπόβαθρο, για να μπορέσει ο αναγνώστης να κατανοήσει το αντικείμενο που πραγματεύεται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα πρέπει να κατέχει βασικές γνώσεις μηχανικής όπως αντοχή των υλικών, γνώσεις μαθηματικών (διαφορικές εξισώσεις) και να είναι σε θέση να διαβάζει κατασκευαστικά σχέδια πλοίων. Δεν απαιτείται γνώση Πεπερασμένων Στοιχείων διότι στην παρούσα εργασία επεξηγείται αναλυτικά το θεωρητικό υπόβαθρο της Μεθόδου και θα δώσει στον αναγνώστη μια νέα διάσταση στην επίλυση προβλημάτων αντοχής.

## Γενικά περί κεφαλαίων

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται και επεξηγείται το στοιχείο της φρακτής καθώς και απαραίτητοι ορισμοί χαρακτηριστικών μεγεθών του πλοίου. Στην συνέχεια, αναλύονται οι κανονισμοί που αφορούν το αντικείμενο της φρακτής, των κατασκευαστικών λεπτομερειών και προσδιορίζονται τα ελάχιστα όρια αντοχής. Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται η νομοθεσία του ABS που αφορά την πρωραία φρακτή συγκρούσεως και την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της Μηχανικής Επιστήμης. Αναλύεται το φαινόμενο της κάμψης στα μεταλλικά ενισχυμένα ελάσματα, η υδροστατική πίεση και ερμηνεύονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται στην φρακτή.

Στο τρίτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων καθώς και βασικές έννοιες που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα στην μοντελοποίηση ενός στοιχείου.

Το τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί το πειραματικό μέρος. Αρχικά ορίζεται η φρακτή (διαστάσεις, ενισχύσεις) σύμφωνα με τις απαιτήσεις που δίνονται από τους κανονισμούς του ABS. Γίνεται μελέτη σε κάμψη κάνοντας χρήση κατάλληλων διαγραμμάτων (Schade) και στην συνέχεια γίνεται η ανάλυση του μοντέλου στο ANSYS. Στο τέλος, θα πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση, εφόσον χρειαστεί, και θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων τόσο των δύο μεθόδων όσο και με τα όρια που δίνουν οι κανονισμοί. Επίσης, παρουσιάζονται βασικά σχέδια του πλοίου (κατασκευαστικά σχέδια).

Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει συμπεράσματα και προτάσεις, δίνοντας έμφαση στα αποτελέσματα, και παρουσιάζεται η απαραίτητη βιβλιογραφία.

## Αποτέλεσμα

Μετά το πέρας της ανάγνωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και για να χαρακτηριστεί επιτυχής, θα πρέπει ο αναγνώστης να έχει καταλάβει το θέμα που πραγματεύεται και να έχει κατανοήσει πως εφαρμόζεται η σύγχρονη Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων σε προβλήματα αντοχής, ανοίγοντας με τον τρόπο αυτό έναν νέο ορίζοντα στην Ναυπηγική Επιστήμη.



# 1. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

## 1.1 ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΕΣ

### 1.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Νηογνώμονες είναι μη κερδοσκοπικοί οργανισμοί οι οποίοι εκδίδουν κανονισμούς ασφαλείας και απαιτήσεις για την ναυπηγική βιομηχανία. Μερικές από τις αρμοδιότητες τους μπορεί να είναι επιθεωρήσεις πλοίων, έλεγχος και έγκριση ναυπηγικών σχεδίων και μελετών, παρακολούθηση ναυπήγησης ή μετασκευής πλοίου, έλεγχος και πιστοποίηση εξοπλισμού, υλικών και συγκολλήσεων, παρακολούθηση δοκιμών παραλαβής, έλεγχος μηχανολογικών, ψυκτικών και ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων κ.α. Γενικότερα επιβλέπουν, επιθεωρούν και εγκρίνουν όλες τις ναυπηγικές εργασίες και κατασκευές, ενώ έχουν και συμβουλευτικό χαρακτήρα όταν κριθεί αναγκαίο. Γενικότερα, οι νηογνώμονες εκδίδουν μια πληθώρα πιστοποιητικών που αφορούν θέματα αξιοπλοΐας και ασφάλειας όπως πυρόσβεσης και σωστικών μέσων, ενδιαίτησης, τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού, εξοπλισμού μηχανοστασίου και πολλά ειδικής φύσεως απαραίτητα πιστοποιητικά. Όσον αφορά το επιχειρηματικό κομμάτι, είναι εταιρείες κατεχόμενες από ιδιωτικά κεφάλαια και πάντα θα υφίσταται μια μορφή ανταγωνισμού μεταξύ των οργανισμών. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται αναγνωρισμένοι Νηογνώμονες διεθνούς βεληνεκούς με παγκόσμια δράση στην ναυπηγική βιομηχανία.

ABS - Αμερικανικός Νηογνώμονας (American Bureau of Shipping)

BV- Γαλλικός Νηογνώμονας (Bureau Veritas)

CCS - Κινεζικός Νηογνώμονας (China Classification Society)

CRS - Κροατικός Νηογνώμονας (Croatian Register of Shipping)

DNV - Νορβηγικός Νηογνώμονας (Det Norske Veritas)

GL - Γερμανικός Νηογνώμονας (Germanischer Lloyd)

IR - Ινδικός Νηογνώμονας (Indian Register of Shipping)

KR - Κορεατικός Νηογνώμονας (Korean Register of Shipping)

LR - Αγγλικός Νηογνώμονας (Lloyd's Register of Shipping)

NKK - Ιαπωνικός Νηογνώμονας (Nippon Kaiji Kyokai)

PRS - Πολωνικός Νηογνώμονας (Polish Register of Shipping)

RINA - Ιταλικός Νηογνώμονας (Registro Italiano Navale)

RS - Ρωσικός Νηογνώμονας (Russian Register of Shipping)

και οι ελληνικοί νηογνώμονες

INSB (International Naval Surveys Bureau)

PHNX (Phoenix Register of Shipping)

### 1.1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ιστορία των Νηογνώμωνων ξεκινάει το μακρινό 1691 στο Λονδίνο, όπου ο Edward Lloyd ιδρύει αρχικά ένα παραδοσιακό καφενείο στο οποίο παρευρίσκονταν αρκετοί άνθρωποι προερχόμενοι από τον χώρο της ναυτιλίας. Ο Edward θέλησε, προκειμένου να ενημερώνει τους πελάτες του καθημερινά για τα δρώμενα της ναυτιλίας, να εκδώσει την εφημερίδα με όνομα ‘Lloyd’s News’ και ύστερα να την μοιράζει στους καθήμενους. Η εφημερίδα με τον καιρό γνώρισε μεγάλη απήχηση και μετά από καιρό οι απόγονοί του συνέχισαν με την επανέκδοση της εφημερίδας με νέο όνομα ‘Lloyd’s List’. Στην πορεία, ο χώρος αυτός μετατρέπεται σε ένα από τα μεγαλύτερα κέντρα ναυλοσυμφώνων στον κόσμο, όπου ναυλωτές και πλοιοκτήτες έρχονται σε διαβουλεύσεις και εν τέλει σε εμπορικές συμφωνίες. Καθώς όμως όλη αυτή η δράση διογκωνόταν, η ανάγκη για ασφάλιση του φορτίου κρινόταν επιτακτική. Θα έπρεπε όμως, προτού το φορτίο ασφαλιστεί, να υπάρχει μια ανεξάρτητη πηγή όπου θα έκρινε την καταλληλότητα του πλοίου και του φορτίου και, φυσικά, που θα εμπιστευόταν και ο ναυλωτής και ο πλοιοκτήτης. Έτσι, το 1760, ιδρύεται η πρώτη εταιρεία για ασφάλιση πλοίου και φορτίου με το όνομα «Register of Shipping», ενώ αργότερα, και πιο συγκεκριμένα το 1826, ιδρύεται ο πρώτος Βρετανικός Νηογνώμονας με το όνομα «Lloyd’s Register of British and Foreign Shipping». Το 1828, ιδρύεται στην Αμβέρσα ο Γαλλικός Νηογνώμονας (BV), ενώ το 1834 ο Βρετανικός μετονομάστηκε σε «Lloyd’s Register of Shipping» και μέχρι σήμερα διατηρεί την ίδια ονομασία. Στην Ελλάδα, ο πρώτος νηογνώμονας ιδρύθηκε το 1919.

### 1.1.3 IACS ΚΑΙ ABS

Η Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων (IACS – International Association of Classification Societies) είναι μία μη κυβερνητική ένωση που αποτελείται, εν έτει 2023, από ένδεκα (11) μέλη Νηογνώμωνων. Αυτοί είναι ο Αμερικάνικος (ABS), ο Νορβηγικός (DNV), ο Κινεζικός (CCS), ο Κροατικός (CRS), ο Γαλλικός (BV), ο Κορεατικός (KR), ο Αγγλικός (LR), ο Ιαπωνικός (NKK), ο Πολωνικός (PRS), ο Ιταλικός (RINA) και ο Ινδικός (IR). Ιδρύθηκε επίσημα στις 11 Σεπτεμβρίου 1968 στο Αμβούργο της Γερμανίας ενώ η έδρα της ένωσης βρίσκεται στο Λονδίνο. Ο ABS ήταν από τα ιδρυτικά μέλη του IACS και ο Νηογνώμονας με την μεγαλύτερη επιρροή. Η θέληση για κοινή πορεία των παραπάνω οργανισμών πραγματοποιήθηκε μέσω της έκδοσης κοινών κανονισμών ασφαλείας CSR (Common Structural Rules) οι οποίοι ισχύουν για πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην (Bulk Carriers) και για πλοία μεταφοράς παραγώγων πετρελαίου ή αλλιώς δεξαμενόπλοια (Oil Tankers). Οι κανονισμοί (CSR) συντάχθηκαν από τα μέλη του IACS για πρώτη φορά το 2004 και εφαρμόστηκαν σε πρώτο στάδιο το 2006. Οι κανόνες CSR συντάχθηκαν με βάση κανονισμούς που υπήρχαν πριν την δημιουργία τους, την εμπειρία κάθε νηογνώμονα σε εξειδικευμένα θέματα καθώς και από την προσεκτική έρευνα των ατυχημάτων που είχαν συμβεί στο παρελθόν, καταγράφοντας αίτια και συμπεράσματα σε μία μεγάλη βάση δεδομένων. Η διαφορά των CSR από τους παλαιότερους κανονισμούς ήταν πως οι παλαιοί δεν ήταν τόσο λεπτομερείς όσον αφορά τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου καθώς και για τις καταστάσεις φόρτισης τις οποίες εξέταζαν. Οι κανονισμοί CSR έχουν εντάξει την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων ως μέθοδος ανάλυσης και περιγράφεται αναλυτικά στα κεφάλαια 7,8 και 9 των κανονισμών. Ο ABS, ως μέλος του IACS, έχει εκδώσει κανονισμούς που εναρμονίζονται με τους CSR σε θέματα αντοχής και ελέγχου της κατασκευής. Στην συνέχεια, θα αναλυθούν οι κανονισμοί του ABS και πως αυτοί επηρεάζουν την κατασκευή.

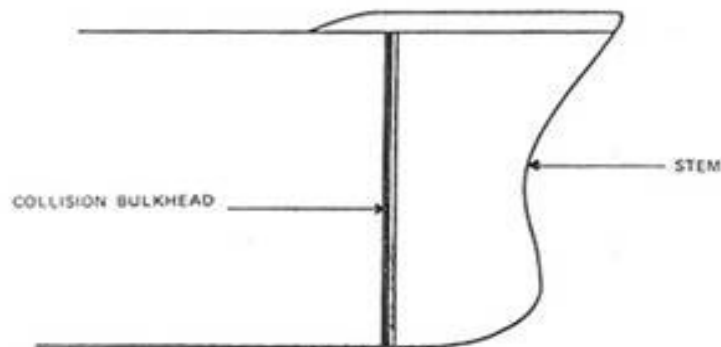
## 1.2 ΤΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΦΡΑΚΤΗ

Σύμφωνα με τους κανονισμούς, κάθε σκάφος με μήκος  $L$  θα πρέπει να διαχωρίζεται κατά μήκος και πλάτος σε περισσότερα από ένα διαμερίσματα μέσω της κατασκευής και τοποθέτησης εγκάρσιων και διαμήκων διαφραγμάτων ή φρακτών (bulkheads), τα οποία εκτείνονται από τον πυθμένα ή την οροφή του διπύθμενου, όταν αυτό υπάρχει, μέχρι το κατάστρωμα αντοχής (strength deck). Κατασκευαστικά, αποτελούνται συνήθως από οριζόντια ελάσματα με μειούμενο πάχος προς τα πάνω, και αυτό διότι οι μεγαλύτερες τάσεις ασκούνται στο κάτω μέρος της φρακτής. Κύριος σκοπός ύπαρξης είναι η στεγανοποίηση των επιμέρους διαμερισμάτων σε περίπτωση κατάκλισης καθώς και η συμβολή τους στην εγκάρσια και διαμήκη αντοχή του πλοίου. Οι φορτίσεις στις φρακτές ασκούνται κυρίως κάθετα ως προς το επίπεδό τους αλλά και επί του επιπέδου τους (συνήθως στις διαμήκεις φρακτές), για παράδειγμα η μεταφορά φορτίων από τις υπερκατασκευές συμβάλλοντας στην ακαμψία της κατασκευής. Οι φρακτές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- 1) Στεγανές φρακτές (watertight bulkheads): Χωρίζονται σε φρακτές στεγανής υποδιαίρεσης και σε φρακτές που αποτελούν τοιχώματα δεξαμενών. Οι στεγανές φρακτές υπόκεινται σε πιέσεις από υγρά φορτία (πετρέλαιο, λάδι) καθώς και από νερό σε περίπτωση κατάκλισης ή σε κατάσταση ερματισμού. Υπάρχουν υδατοστεγείς και ελαιοστεγείς φρακτές και διαφέρουν στην ποιότητα και το είδος των συγκολλήσεων και αυτό διότι τα παράγωγα του πετρελαίου ή τα ελαιώδη έχουν μεγαλύτερη διαπερατότητα από το νερό. Επιπλέον, απαγορεύεται η ύπαρξη ανοιγμάτων καθ' όλη την επιφάνεια της φρακτής.
- 2) Μη στεγανές φρακτές: Οι φρακτές αυτές τοποθετούνται για λόγους ενίσχυσης και όχι για λόγους στεγανοποίησης και συνεπώς μπορεί να φέρουν ανοίγματα όπως σωληνώσεις ή θύρες.

### Πρωραία Υδατοστεγής Φρακτή Συγκρούσεως (Forepeak Watertight Collision Bulkhead)

Η κατασκευή της είναι υποχρεωτική καθώς προφυλάσσει τα υπόλοιπα διαμερίσματα από κατάκλιση σε περίπτωση σύγκρουσης. Τοποθετείται σε συγκεκριμένη απόσταση πρύμνηθεν της πρωραίας καθέτου (fore perpendicular), απόσταση η οποία εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου, την διαμόρφωση της πλώρης και υπολογίζεται από τους κανονισμούς. Το διαμέρισμα που βρίσκεται πύραθεν της φρακτής συγκρούσεως και κάτω από το κατάστρωμα των στεγανών φρακτών ονομάζεται πρωραίο στεγανό (fore peak) και στο οποίο τοποθετείται αποκλειστικά υγρό έρμα. Η φρακτή απαγορεύεται να διαθέτει ανοίγματα και θα πρέπει να εκτείνεται μέχρι το κατάστρωμα εξάλλων.



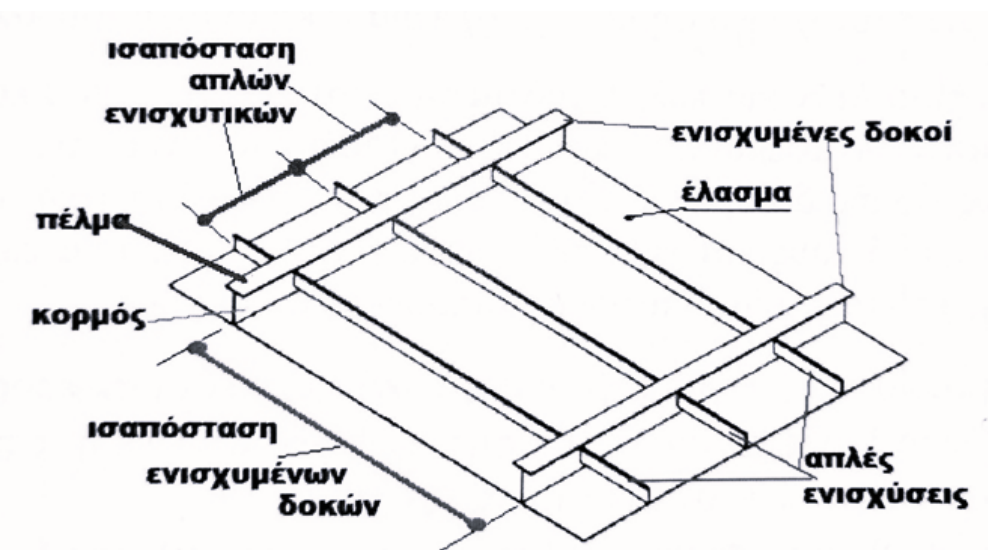
Εικόνα 1. Θέση πρωραίας υδατοστεγούς φρακτής συγκρούσεως.

Μια ιδιαίτερη κατηγορία φρακτών είναι οι κυματοειδής (corrugated bulkheads) οι οποίες διαθέτουν αυλακώσεις και μπορεί να είναι είτε οριζόντιες είτε κάθετες. Αυτό που επιτυγχάνεται ουσιαστικά είναι η αύξηση της ροπής αδρανείας της τομής, δεδομένου ότι δημιουργείται μάζα μακριά από τον ουδέτερο άξονα. Στις εγκάρσιες φρακτές οι πτυχώσεις είναι συνήθως κάθετες και κάθε μια πτύχωση μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα ζεύγος ενισχύσεων σε μορφή "Z" συμμετρικά τοποθετημένες. Το χαρακτηριστικό αυτών των φρακτών είναι ότι διαθέτουν λείες επιφάνειες και έτσι καθαρίζονται με μεγάλη ευκολία, γι' αυτό και συνήθως συναντώνται στα κοίτη φορτίου. Σε περίπτωση που οι κυματώσεις είναι οριζόντιες, τότε τοποθετούνται κατακόρυφα ενισχυτικά με σκοπό την στήριξη του καταστρώματος στο οποίο καταλήγει η φρακτή. Όσον αφορά τις κατακόρυφες κυματοειδείς φρακτές, αυτές απαγορεύονται σε πλοία με μήκος  $L > 180$  m.

### Ενισχυτικά (Stiffeners)

Σύμφωνα με τους κανονισμούς του ABS, τα ελάσματα των φρακτών μπορούν να ενισχυθούν από κατακόρυφα και οριζόντια ενισχυτικά και χωρίζονται σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα. Τα πρωτεύοντα ενισχυτικά είναι ενισχυμένες δοκοί ενώ τα δευτερεύοντα είναι απλά ενισχυτικά. Η επιλογή του συστήματος ενίσχυσης εξαρτάται από το σύστημα ενίσχυσης του σκάφους. Συνήθως επιλέγονται κατακόρυφα ενισχυτικά διότι έτσι εξασφαλίζεται η απαραίτητη αντοχή της φρακτής από δυνάμεις που ασκούνται από το φορτίο, από πιέσεις λόγω δεξαμενισμού, κατάκλυσης κλπ. Δίνεται η δυνατότητα όμως να τοποθετούνται ταυτόχρονα οριζόντια και κατακόρυφα ενισχυτικά. Για τις ενισχύσεις (απλές και σύνθετες) οι σχέσεις υπολογισμού προδιαγράφουν μια ελάχιστη ροπή αντίστασης που εξαρτάται από το πλάτος του συνεργαζόμενου ελάσματος, το ανυποστήρικτο μήκος του ενισχυτικού, το ύψος του φορτίου και το είδος του υλικού. Τα πιο συνηθισμένα είδη ενισχυτικών σε φρακτές είναι:

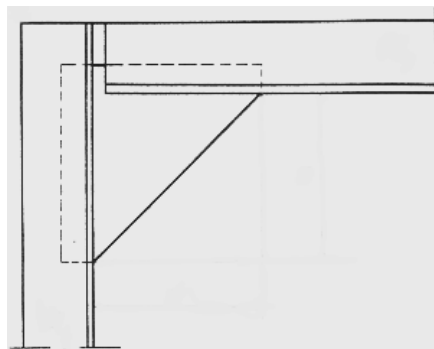
- 1) Βολβολάμα.
- 2) Ενισχυτικό Τύπου T.
- 3) Ενισχυτικό Τύπου Γ.
- 4) Ενισχυτικό Τύπου Η.
- 5) Απλή λάμα.



Εικόνα 2. Απεικόνιση ενισχυμένης πλάκας.

### Αγκώνες σύνδεσης (Brackets)

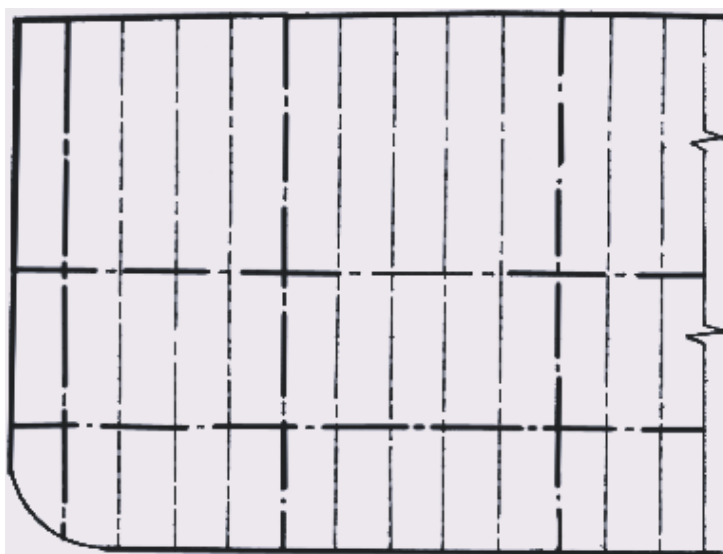
Είναι κομμάτια ελάσματος που ενώνουν δύο κατασκευαστικά στοιχεία (π.χ. ενισχυτικά). Υπάρχουν στα άκρα κάθε κατακόρυφου ενισχυτικού καθώς και στον κορμό των οριζόντιων ενισχυτικών.



Εικόνα 3. Αγκώνας σύνδεσης.

### Αποτύπωση

Η αποτύπωση των κατασκευαστικών στοιχείων πρέπει είναι απλή και κατανοητή. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διεθνείς κανόνες και συμβολισμοί με τους οποίους περιγράφονται τα ελάσματα και τα ενισχυτικά ολόκληρης της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Θα πρέπει να διευκρινιστεί πως οι κανόνες κατασκευαστικής σχεδίασης δεν εξαρτώνται από το είδος ή το μέγεθος του πλοίου. Ένα λεπτομερές κατασκευαστικό σχέδιο αποτελείται από γραμμές οι οποίες ανάλογα με την μορφή τους αποτυπώνουν και διαφορετικό κατασκευαστικό στοιχείο στην κατασκευή. Η λεπτή συνεχής γραμμή παριστάνει περιγράμματα και ακμές ελασμάτων, η παχιά συνεχής γραμμή παριστάνει περιγράμματα ελασμάτων σε τομή (πάχος), η λεπτή διακεκομμένη γραμμή παριστάνει λεπτομέρεια σε διαφορετικό επίπεδο, η παχιά διακεκομμένη γραμμή παριστάνει έλασμα πίσω από έλασμα, το λεπτό ευθύγραμμο τμήμα γραμμής-σημείου (αξονική γραμμή) παριστάνει δευτερεύον ενισχυτικό ή άξονα συμμετρίας ενώ το παχύ ευθύγραμμο τμήμα γραμμής-σημείου (αξονική γραμμή) παριστάνει πρωτεύον ενισχυτικό.



Εικόνα 4. Κατασκευαστικό σχέδιο φρακτής.

## 1.3 ΕΝΟΤΗΤΕΣ ABS

### *Rules for Building and Classing Marine Vessels (Jan/23).*

#### PART 1 – Conditions of Classifications

Στο πρώτο μέρος των κανονισμών γίνεται περιληπτική αναφορά σε διαδικαστικές λεπτομέρειες όπως η πολιτική του ABS σε θέματα ελέγχου, επιθεώρησης και υποβαλλόμενων εγγράφων. Διευκρινίζονται πρόσθετες απαιτήσεις για ειδικές κλάσεις πλοίων και αναφέρονται σχετικοί συμβολισμοί.

#### PART 2 – Materials and Welding

Στο δεύτερο μέρος των κανονισμών γίνεται αναφορά στα υλικά που δύναται να χρησιμοποιηθούν, στον τρόπο παραγωγής τους, στην χημική σύνθεση τους και ορίζονται οι απαιτήσεις αντοχής και προστασίας από την διάβρωση. Αναλύονται τα κατάλληλα είδη συγκολλήσεων και ο έλεγχος τους.

#### PART 3 – Hull Construction and Equipment

Στο τρίτο μέρος ορίζονται όλες οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες για την μεταλλική γάστρα και του εξοπλισμού του πλοίου. Προσδιορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις αντοχής των στοιχείων και γίνεται αναφορά στην ανάλυσή τους με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων.

#### PART 4 – Vessels Systems and Machinery

Στο τέταρτο μέρος των κανονισμών γίνεται εκτενής αναφορά στα μηχανολογικά συστήματα του πλοίου όπως οι μηχανές, το σύστημα πρόωσης, τα συστήματα ψύξης, το σύστημα πυρόσβεσης κ.α.

#### PART 5 A,B – Specific Vessel Types/CSR for Bulk Carriers and Oil Tankers

Το πρώτο μέρος της πέμπτης ενότητας παρουσιάζονται οι απαιτήσεις των Κοινών Κανονισμών Ασφαλείας (CSR) του έχει εκδώσει ο IACS για πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην και δεξαμενόπλοια.

#### PART 5 C1 – Specific Vessel Types (Chapters 1-6)

Στο μέρος αυτό παρουσιάζονται οι κανονισμοί ασφαλείας για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων καθώς και για τα είδη πλοίων της προηγούμενης ενότητας που όμως λόγω χαρακτηριστικών δεν καλύπτονται από το PART 5 A,B.

#### PART 5 C2 – Specific Vessel Types (Chapters 7-19)

Παρουσιάζονται οι κανονισμοί ασφαλείας για τα υπόλοιπα είδη πλοίων κάτω των 90 μέτρων σε μήκος.

#### PART 5 D – Offshore Support Vessels for Specialized Services

Παρουσιάζονται οι κανονισμοί ασφαλείας για ειδικά πλοία με υπεράκτιο υποστηρικτικό ρόλο.

#### PART 6 – Specialized Items and Systems

Παρουσιάζονται οι κανονισμοί ασφαλείας για ειδικά συστήματα πλοίων όπως παγοθραυστικά.

#### PART 7 – Survey After Construction

Παρουσιάζονται σχετικές διατάξεις των κανονισμών για επιθεώρηση μετά την κατασκευή.



## 1.4 ΧΡΗΣΙΜΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Στην παρούσα ενότητα καταγράφονται κάποιοι χρήσιμοι ορισμοί της κατασκευής του πλοίου που αναφέρει και χρησιμοποιεί ο Αμερικανικός Νηογνώμονας στους κανονισμούς που θα ακολουθηθούν. Η γραφή 3-1-1/1 σημαίνει part 3/chapter 1/section 1/paragraph 1.

### Part 3/Chapter 1/Section 1/3.1

#### Μήκος Υπολογισμού $L$ (Scantling Length $L$ )

Είναι το μήκος υπολογισμού που χρησιμοποιείται στους κανονισμούς του ABS για τους υπολογισμούς κατασκευαστικών στοιχείων του σκάφους. Είναι η απόσταση, σε μέτρα (m), της ισάλου στο βύθισμα σχεδίασης και εκτείνεται από το σημείο τομής της ισάλου σχεδίασης με το ακροπρωαίο περίγραμμα μέχρι το σημείο που βρίσκεται στον άξονα περιστροφής του πηδαλίου ( $L_{BP}$ ). Για πλοία χωρίς πηδάλιο, το μήκος υπολογισμού λαμβάνεται ως το 97% του μήκους της ισάλου στο βύθισμα σχεδίασης. Ορίζεται ως εξής:

$$L = L_{BP} \quad \text{αν} \quad 0.96 L_{WL} \leq L_{BP} \leq 0.96 L_{WL}$$

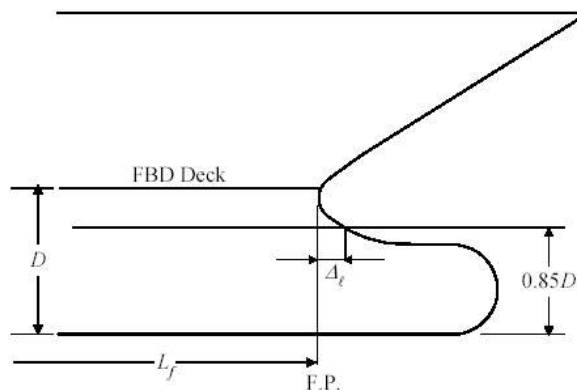
$$L = 0.96 L_{WL} \quad \text{αν} \quad L_{BP} < 0.96 L_{WL}$$

$$L = 0.97 L_{WL} \quad \text{αν} \quad L_{BP} > 0.97 L_{WL}$$

### Part 3/Chapter 1/Section 1/3.3

#### Μήκος Εξάλων $L_f$ (Freeboard Length $L_f$ )

Μήκος εξάλων ή αλλιώς μήκος γραμμής φορτώσεως είναι η απόσταση, σε μέτρα (m), από το πρωαίο άκρο της ισάλου μέχρι τον άξονα περιστροφής του πηδαλίου στο 85% του κοίλου ή το 96% του μήκους ισάλου στο 85% του κοίλου, όποιο είναι μεγαλύτερο. Αν η καμπύλη της πλώρης είναι ομαλή πάνω από την ίσαλο στο 85% του κοίλου και το ακροπρυμναίο σημείο είναι πάνω από την ίσαλο αυτή, τότε το ακροπρωαίο σημείο του  $L_f$  λαμβάνεται στο σημείο τομής της ισάλου με το περίγραμμα της πλώρης.



Εικόνα 5. Προσδιορισμός του μήκους εξάλων σχηματικά.

### Part 3/Chapter 1/Section 1/15.1

#### Κατάστρωμα εξάλων (Freeboard Deck)

Κατάστρωμα εξάλων ονομάζεται το ανώτατο πλήρες κατάστρωμα που είναι εκτεθειμένο στις καιρικές συνθήκες (κύμα, αέρας) και έχει μόνιμα μέσα σφραγίσματος των ανοιγμάτων του έναντι καιρού. Κάτω από τα ανοίγματα αυτά και πάνω στην πλευρά του πλοίου βρίσκονται μόνιμα μέσα υδατοστεγούς κλεισίματος. Αν για το πλοίο προβλέπεται ειδικό βύθισμα αρκετά μικρότερο από αυτό που αντιστοιχεί στο ελάχιστο ύψος εξάλων που προκύπτει από την Διεθνή Σύμβαση Γραμμών Φόρτωσης (International Load Line Regulations), τότε σαν κατάστρωμα εξάλων μπορεί να θεωρηθεί το κατώτερο πραγματικό κατάστρωμα από το οποίο μπορεί να ληφθεί το βύθισμα υπολογισμού με βάση τη σύμβαση.

### Part 3/Chapter 1/Section 1/15.3

#### Κατάστρωμα Φρακτής (Bulkhead Deck)

Κατάστρωμα φρακτής ονομάζεται το ανώτερο κατάστρωμα στο οποίο καταλήγει η φρακτή και διατηρεί την αντοχή και στεγανότητα της.

### Part 3/Chapter 1/Section 1/15.5

#### Κατάστρωμα Αντοχής (Strength Deck)

Κατάστρωμα αντοχής ονομάζεται το ανώτερο κατάστρωμα που συμβάλλει στην διαμήκη αντοχή του πλοίου. Είναι το ανώτερο κατάστρωμα που διαμορφώνει το πάνω πέλμα της διαδοκίδας σε όλο το μήκος της ή το ανώτερο κατάστρωμα στο οποίο εκτείνεται το πλαϊνό έλασμα, εκτός αν υπάρχουν υπερκατασκευές, όπου το πλαϊνό έλασμα και το κατάστρωμα υπερκατασκευών επιδέχονται τροποποιήσεις σύμφωνα με τους κανονισμούς 3-2-2/3 και 3-2-11/1.3 του ABS αντίστοιχα. Τότε το κατάστρωμα αντοχής είναι το κατάστρωμα υπερκατασκευών.

### Part 3/Chapter 1/Section 1/15.7

#### Κατάστρωμα Υπερκατασκευής (Superstructure Deck)

Το κατάστρωμα υπερκατασκευών βρίσκεται πάνω από το κατάστρωμα εξάλων όπου εκτείνεται το πλαϊνό έλασμα του εξωτερικού περιβλήματος.

### Part 3/Chapter 1/Section 1/21

#### Τοπικές Ενισχύσεις (Local Supporting Members)

Τοπικές ενισχύσεις ονομάζονται τα κατασκευαστικά στοιχεία (νομείς, εγκαρσιώματα, διαμήκη ενισχυτικά) που στηρίζουν απευθείας το έλασμα.



## 1.5 ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

### 1.5.1 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Οι κανονισμοί που προσδιορίζουν τα ελάχιστα όρια αντοχής που απαιτούνται για την διαμόρφωση του μοντέλου της φρακτής ανήκουν στο τρίτο μέρος των κανονισμών του ABS και συγκεκριμένα

#### PART 3 - Hull Construction and Equipment

#### CHAPTER 2 – Hull Structures and Arrangements

#### SECTION 9 – Watertight Bulkheads and Doors

##### Γενικά (3-2-9/1.1)

Ο κανονισμός ABS αναφέρει πως όλα τα σκάφη με μήκος L θα πρέπει να είναι κατασκευασμένα με στεγανές φρακτές ενώ στα σχέδια θα πρέπει να αναπαρίσταται με σαφήνεια η θέση και η έκταση κάθε στεγανής φρακτής που κατασκευάζεται σύμφωνα με τους κανονισμούς.

##### Ανοίγματα (3-2-9/1.3)

Σύμφωνα με τον κανονισμό, ο αριθμός των ανοιγμάτων στις στεγανές υποδιαίρεσεις πρέπει να αποφεύγεται όσο το δυνατόν περισσότερο, αλλά να μην επηρεάζει αρνητικά το σχεδιασμό και την λειτουργία του σκάφους. Σε περιπτώσεις όπου τα ανοίγματα των στεγανών φρακτών και του εσωτερικού καταστρώματος είναι απαραίτητα για πρόσβαση, τοποθέτηση σωληνώσεων, εξαερισμό, τοποθέτηση ηλεκτρικών καλωδίων κλπ. θα πρέπει πρώτα να εξασφαλιστεί η στεγανότητα της κατασκευής με τα ανοίγματα αυτά. Για μεγαλύτερη ανοχή των κανονισμών σε τέτοιου είδους ανοίγματα, θα πρέπει πρώτα να αποδειχθεί ότι οποιαδήποτε κατάκλυση μπορεί εύκολα να ελεγχθεί και ότι δεν επηρεάζεται η ασφάλεια του σκάφους. Συγκεκριμένα, διατρήσεις εξαερισμού μέσα από στεγανές φρακτές θα πρέπει να αποφεύγονται. Αν είναι υποχρεωτικές, θα πρέπει να πληρούν τις προϋποθέσεις για στεγανότητα ή να τοποθετηθούν ειδικές συσκευές κλεισίματος. Αν είναι κάτω από το κατάστρωμα της φρακτής, οι συσκευές κλεισίματος θα πρέπει να ελέγχονται είτε από τη γέφυρα είτε χειροκίνητα.

##### Βαλβίδες (3-2-9/1.5)

Κανένα είδος βάνας (βαλβίδα) ή φλάντζας δεν επιτρέπεται να τοποθετείται σε προσωαία φρακτή συγκρούσεως. Αν τοποθετηθούν σε υπόλοιπες υδατοστεγείς φρακτές, θα πρέπει να τηρούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις του κεφαλαίου 4-6-2/9.7.4.

### Στεγανότητα (3-2-9/1.13.1)

Οποιαδήποτε στεγανή φρακτή και συγκεκριμένα η πρωραία φρακτή συγκρούσεως θα πρέπει να εμποδίζει την διέλευση οποιουδήποτε ρευστού. Θα πρέπει να συμβολίζονται με τα αρχικά WT (WaterTight).

### Πρωραία Υδατοστεγής Φρακτή Συγκρούσεως (3-2-9/3.1)

#### Γενικά (3-2-9/3.1.1)

Όλα τα σκάφη θα πρέπει υποχρεωτικά να διαθέτουν πρωραία φρακτή συγκρούσεως χωρίς ανοίγματα, εκτός αν ζητείται από τους κανονισμούς. Διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις (σύμφωνα με 4-6-2/9.7.3):

- Άνοιγμα με έναν σωλήνα για την μεταφορά υγρού στη δεξαμενή του πρωραίου διαμερίσματος, υπό την προϋπόθεση ότι ο σωλήνας είναι εφοδιασμένος με μια βιδωτή βαλβίδα (screwdown) ή βαλβίδα τύπου πεταλούδας (butterfly) και να μπορεί να ελεγχθεί (monitor) πάνω από το κατάστρωμα της φρακτής. Θα πρέπει επίσης να υπάρχουν ενδείξεις ανοιχτό/κλειστό τοπικά αλλά και πάνω από το κατάστρωμα της φρακτής. Οι βαλβίδες μπορούν να τοποθετηθούν πρύμνηθεν της φρακτής, θα πρέπει όμως να είναι άμεσα προσβάσιμες σε όλες τις συνθήκες και ο χώρος τοποθέτησης να μην είναι χώρος φορτίου. Επιτρέπεται και ο χειροκίνητος έλεγχος τοπικά.

- Αν η δεξαμενή του πρωραίου διαμερίσματος έχει δύο είδη υγρών, τότε η φρακτή συγκρούσεως μπορεί να διατηρηθεί κάτω από την γραμμή ασφαλείας (margin line) με δύο σωλήνες οι οποίες θα έχουν ανάλογες βαλβίδες όπως του παραρτήματος Α, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει άλλη πρακτική λύση και ότι δεν επηρεάζεται η ασφάλεια του πλοίου.

Η φρακτή συγκρούσεως θα πρέπει να εκτείνεται σε ένα επίπεδο και μέχρι το κατάστρωμα εξάλλων, ενώ δύναται να δημιουργεί σκαλοπάτι. Στην περίπτωση που το σκάφος διαθέτει μεγάλες υπερκατασκευές στο πρωραίο άκρο, η στεγανότητα θα πρέπει να εκτείνεται μέχρι το κατάστρωμα της υπερκατασκευής πάνω από το κατάστρωμα εξάλλων. Η επέκταση της στεγανότητας δεν είναι απαραίτητο να συνεχίζει πάνω από την φρακτή, αλλά μπορεί να συνεχίζει από άλλο σημείο, υπό την προϋπόθεση ότι τηρείται η στεγανότητα.

#### Διάταξη (3-2-9/3.1.2)

Η φρακτή συγκρούσεως θα πρέπει να είναι τοποθετημένη σε οποιοδήποτε σημείο σε απόσταση όχι μικρότερη του  $0.05L_r$  πρύμνηθεν του σημείου αναφοράς. Σε πλοία με ολική χωρητικότητα (gross tonnage) 500 κόρων ή μεγαλύτερη, θα πρέπει η απόσταση της φρακτής να μην ξεπερνά το  $0.08L_r$  ή  $0.05L_r + 3m$ , όποιο από τα δύο νούμερα είναι μεγαλύτερο, από το σημείο αναφοράς.

#### Σημείο αναφοράς (3-2-9/3.1.3)

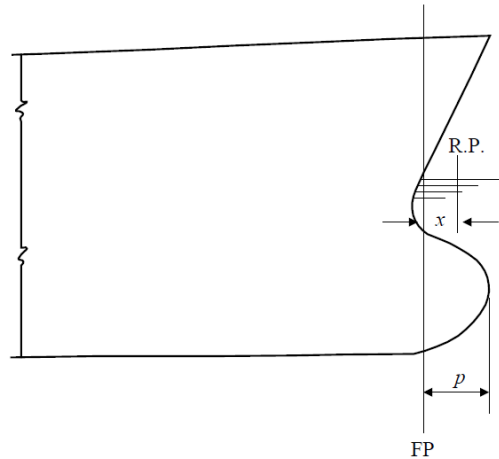
Ως σημείο αναφοράς ορίζεται το πρωραίο σημείο του μήκους  $L_r$  (πρωραία κάθετος) από το οποίο υπολογίζεται η απόσταση για την τοποθέτηση της πρωραίας φρακτής συγκρούσεως.

Για πλοία που διαθέτουν βολβοειδής πλώρη και εξέχουν του μήκους  $L_T$ , η απόσταση υπολογίζεται από ένα νέο σημείο αναφοράς πρόωραθεν του τελευταίου σημείου του  $L_T$ . Η απόσταση αυτή συμβολίζεται με  $x$  και επιλέγεται ως η μικρότερη από τις παρακάτω περιπτώσεις.

- Το μισό της απόστασης μεταξύ του τελευταίου σημείου του  $L_T$  (πρωραία κάθετος) και του τελευταίου σημείου της προέκτασης του βολβού ( $p/2$ ).
- $0,015L_T$
- 3 m

Όπου,

$L_T = L_f$  από 3-1-1/3.3



Εικόνα 6. Θέση σημείου αναφοράς για πρωραία στεγανή φρακτή πλοίου με βολβό.

### Υπολογισμός ελάχιστου πάχους ελάσματος (3-2-9/5.1)

Το πάχος του ελάσματος της στεγανής φρακής δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$t = sk\sqrt{qh}/c + 1.5 \text{ mm}$$

Αλλά όχι μικρότερο από 6 mm ή  $s/200 + 2.5 \text{ mm}$ , όποιο είναι μεγαλύτερο.

Όπου,

$t$  = πάχος ελάσματος σε mm.

$s$  = ισαπόσταση ενισχυτικών σε mm.

$$k = (3.075\sqrt{\alpha} - 2.077)/(\alpha + 0.272) \quad (1 \leq \alpha \leq 2)$$

$$= 1.0 \quad (\alpha > 2)$$

$\alpha$  = ο λόγος των πλευρών του ελάσματος (μεγαλύτερη/μικρότερη).

$q$  =  $235/Y \text{ N/mm}^2$  (συντελεστής υλικού)

$Y$  = το ελάχιστο όριο διαρροής του υλικού σε  $\text{N/mm}^2$  ή το 72% του ορίου σε εφελκυσμό, όποιο είναι μικρότερο.

$h$  = η απόσταση σε m από το χαμηλότερο σημείο της πλάκας μέχρι το κατάστρωμα στεγανών φρακτών στο κέντρο, αν το κατάστρωμα εξάλων και στεγανών φρακτών συμπίπτουν.

Αν το κατάστρωμα εξάλων είναι χαμηλότερο από το κατάστρωμα της στεγανής φρακτής, τότε η απόσταση  $h$  δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από την απόσταση κατώτερου σημείου ελάσματος-κατάστρωμα εξάλων.

$c = 254$  για φρακτή σύγκρουσης κάτω από κατάστρωμα εξάλων ή κατάστρωμα της φρακτής.  
= 290 για λοιπές περιπτώσεις υδατοστεγών φρακτών.

Για πλοία κάτω των 30.5 μέτρων σε μήκος και για ενδιάμεσο χάλυβα, μπορούν να γίνουν μειώσεις στο πάχος της φρακτής 0.25 mm.

### **Υπολογισμός ελάχιστης ροπής αντίστασης απλών ενισχυτικών (3-2-9/5.3)**

Για την διαδικασία εκλογής δευτερευόντων ενισχυτικών, οι κανονισμοί υπολογίζουν την ελάχιστη ροπή αντίστασης SM (section modulus) από τον τύπο:

$$SM = 7.8 kchs l^2 \text{ cm}^3$$

Όπου,

$k = 1.00$  για ενισχυτικά σε στεγανές φρακτές.

= 1.25 για ενισχυτικά σε πρωραία φρακτή συγκρούσεως κάτω από το κατάστρωμα εξάλων.

$c = 0.30$  για ενισχυτικό με αγκώνες σύνδεσης και στα δύο άκρα του κορμού του.

= 0.43 για ενισχυτικό με έναν αγκώνα σύνδεσης στην μία πλευρά και σύνδεση με κλιπ ή με πρωτεύον ενισχυτικό στο άλλο.

= 0.56 για ενισχυτικό με σύνδεση κλιπ και στα δύο άκρα ή στην μία κλιπ και στην άλλη πρωτεύον ενισχυτικό.

= 0.60 για ενισχυτικό που και στα δύο άκρα του υπάρχει πρωτεύον ενισχυτικό (διαδοκίδα, σταθμίδα) ή για ενισχυτικό με ελεύθερα άκρα.

Για πλοία κάτω των 46 μέτρων σε μήκος, το  $c$  μπορεί να πάρει τιμές 0.29, 0.38, 0.46, 0.58 αντίστοιχα.

$l$  = η απόσταση σε m του ανυποστήρικτου μήκους του ενισχυτικού. Σε περίπτωση που υπάρχουν οριζόντια πρωτεύοντα ενισχυτικά, το  $l$  υπολογίζεται ως το ανυποστήρικτο μήκος μέχρι το πρώτο ενισχυτικό ή η απόσταση μεταξύ των οριζόντιων ενισχυτικών.

$s$  = η ισαπόσταση των ενισχυτικών σε m.

$h$  = η απόσταση σε m από το μέσον του  $l$  μέχρι το κατάστρωμα στεγανών φρακτών στο κέντρο, αν το κατάστρωμα εξάλων και στεγανών φρακτών συμπίπτουν.

Αν το κατάστρωμα εξάλων είναι χαμηλότερο από το κατάστρωμα της στεγανής φρακτής, τότε η απόσταση  $h$  δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη της απόστασης από το μέσον του  $l$  μέχρι το κατάστρωμα εξάλων στο κέντρο.

Αν η παραπάνω απόσταση είναι μικρότερη των 6.1 m, η απόσταση  $h$  λαμβάνεται ως 0.8 φορές της απόστασης αυτής συν 1.22 m.

Για πλοία κάτω των 46 μέτρων σε μήκος, το  $h$  μπορεί να χαρακτηριστεί ως η απόσταση από την μέση του  $l$  μέχρι το κατάστρωμα της φρακτής στο κέντρο σε κάθε περίπτωση.

Οι παραπάνω υπολογισμοί αφορούν ενισχυτικά κατασκευασμένα από κοινό ναυπηγικό χάλυβα κλάσης A (grade A).

### **Υπολογισμός ελάχιστης ροπής αντίστασης κύριων ενισχυτικών (3-2-9/5.7)**

Για την διαδικασία εκλογής πρωτεύοντων ενισχυτικών, οι κανονισμοί υπολογίζουν την ελάχιστη ροπή αντίστασης SM (section modulus) από τον τύπο:

$$SM = 4.74 kchs l^2 \text{ cm}^3$$

Όπου,

$k = 1.00$  για ενισχυτικά σε στεγανές φρακτές.

$= 1.25$  για ενισχυτικά σε προσωαία φρακτή συγκρούσεως κάτω από το κατάστρωμα εξάλων.

$c = 1.0$

$s =$  το άθροισμα των μισών μηκών, σε m, των στηριζόμενων ενισχύσεων σε κάθε πλευρά της ενισχυμένης δοκού.

$l =$  το ανυποστήρικτο μήκος των ενισχυτικών σε m.

$h =$  η απόσταση σε m από το μέσον του  $l$  για εγκαρσιώματα ή από το μέσον του  $s$  για διαμήκη ενισχυτικά μέχρι το κατάστρωμα στεγανών φρακτών στο κέντρο, αν το κατάστρωμα εξάλων και στεγανών φρακτών συμπίπτουν.

Αν το κατάστρωμα εξάλων είναι χαμηλότερο από το κατάστρωμα της στεγανής φρακτής, τότε η απόσταση  $h$  δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη της απόστασης από το μέσον του  $l$  ή  $s$  μέχρι το κατάστρωμα εξάλων στο κέντρο.

Αν η παραπάνω απόσταση είναι μικρότερη των 6.1 m, η απόσταση  $h$  λαμβάνεται ως 0.8 φορές της απόστασης αυτής συν 1.22 m

Τα πρωτεύοντα ενισχυτικά πρέπει να είναι μεγαλύτερα από  $0.0832l$  συν το ένα τέταρτο αυτού σε μήκος και μεγαλύτερα από 1mm για κάθε 100mm μήκους πάχος. Δεν θα πρέπει όμως να ξεπερνούν τα 11.5 mm σε πάχος.

## Υλικό κατασκευής (Part 2)

Ο κοινός ναυπηγικός χάλυβας ή Mild Steel (MS) είναι η απλούστερη μορφή των κραμάτων χάλυβα Fe-C, δηλαδή δεν περιέχονται άλλα στοιχεία κράματος εκτός από μικρά ποσοστά σε Μαγγάνιο (Mn) αλλά και ποσοστά φωσφόρου (P) και θείου (S). Ο κοινός ναυπηγικός χάλυβας κατηγοριοποιείται ανάλογα με την ποιότητα του σε βαθμίδες (Grades): A, B, D και E. Το υλικό κατασκευής της υπό μελέτης φρακτής είναι χάλυβας κατηγορίας A. Βασικά χαρακτηριστικά του χάλυβα είναι το όριο διαρροής (yield stress) και το όριο αντοχής (ultimate tensile stress). Το όριο διαρροής είναι η μέγιστη απαιτούμενη τάση ώστε το υλικό να εισαχθεί στην πλαστική περιοχή, ενώ το όριο αντοχής είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να δεχτεί ο χάλυβας λίγο πριν την θραύση του. Για χάλυβα grade A έχω:

Όριο διαρροής

$$\sigma_y = 235 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

Όριο αντοχής

$$\sigma_u = 400 \sim 520 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

και μέγιστο ποσοστό επιμήκυνσης 22% του αρχικού μήκους πριν την θραύση.

## Χημική σύσταση ναυπηγικού χάλυβα grade A

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Άνθρακας (Carbon)	0.21 % max.
Μαγγάνιο (Manganese)	2.5 x C % min.
Σιλικόνη (Silicon)	0.5 % max.
Θείο (Sulphur)	0.035 % max.
Φώσφορο (Phosphorus)	0.035 % max.
Αλουμίνιο (Aluminium)	-

Σημείωση: Ο άνθρακας και το 1/6 του μαγγανίου δεν θα πρέπει να ξεπερνούν το 0.40% στο σύνολο.

## 1.5.2 ABS ΚΑΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο Αμερικανικός Νηογνώμονας εφαρμόζει την μέθοδο των ΠΣ για την λεπτομερή ανάλυση κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου και έχει εισάγει στους κανονισμούς του σχετικό κεφάλαιο. Στο κεφάλαιο αυτό δίνει γενικές οδηγίες και ορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για το μοντέλο.

### PART 3 - Hull Construction and Equipment

#### CHAPTER 2 – Hull Structures and Arrangements

#### SECTION 20 – Guidance on Finite Element Analysis

### Μοντελοποίηση (3-2-20/3)

#### Είδη Πεπερασμένων Στοιχείων (3-2-20/3.1)

Το είδος του πεπερασμένου στοιχείου που θα επιλεγεί καθορίζεται από την πολυπλοκότητα της κατασκευής, τον τύπο του στοιχείου που θα αναλυθεί και το επίπεδο της ανάλυσης. Το στοιχείο γραμμή δύο κόμβων και το στοιχείο πλάκα τριών ή τεσσάρων κόμβων θεωρούνται αρκετά για την αναπαράσταση μιας κατασκευής. Ανώτερα είδη στοιχείων μπορούν επίσης να εφαρμοστούν. Λεπτομέρειες για τα είδη στοιχείων δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

#### ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Μονοδιάστατα Στοιχεία	Στοιχείο ράβδος	Στοιχείο γραμμής με αξονική ακαμψία
	Στοιχείο δοκός	Στοιχείο γραμμής με αντοχή σε καμπτικές ροπές και τέμνουσες δυνάμεις κατά την διεύθυνση του άξονα.
Δισδιάστατα Στοιχεία	Στοιχείο μεμβράνης ή επίπεδης τάσης	Στοιχείο πλάκας με ακαμψία και συνεχής δομή.
	Στοιχείο κέλυφος ή καμπτόμενης πλάκας	Στοιχείο πλάκας με ακαμψία σε όλες τις διαστάσεις και συνεχής δομή.
Τρισδιάστατα Στοιχεία	Στοιχείο στερεό	Τετράεδρο ή στοιχείο κύβος με αξονική κάμψη.

#### Είδη Μοντελοποίησης (3-2-20/3.3)

##### Μονοδιάστατο Μοντέλο (3-2-20/3.3.1)

Αποτελείται εξ'ολοκλήρου από μονοδιάστατα στοιχεία (rod, beam elements) και είναι κατάλληλο για ανάλυση προβλημάτων με δοκούς σε εφαρμογές όλων των διαστάσεων (π.χ. ενισχυτικά φρακτών, σταθμίδες, διαδοκίδες).

### Δισδιάστατο Μοντέλο (3-2-20/3.3.2)

Αποτελείται από δισδιάστατα στοιχεία (plate, shell elements) και εφαρμόζεται σε προβλήματα όπου η γεωμετρία του κατασκευαστικού στοιχείου ή του συνολικού συστήματος πρέπει να απεικονισθεί με ακρίβεια ή όταν το πρόβλημα δεν μπορεί να αναλυθεί από μονοδιάστατα στοιχεία.

### Τρισδιάστατο Μοντέλο (3-2-20/3.3.3)

Στο μοντέλο αυτό χρησιμοποιούνται στοιχεία όπου οι διαστάσεις τους είναι συναρτήσει του πάχους. Για ανάλυση κάμψης λεπτότοιχων κατασκευών, ο απαιτούμενος αριθμός τρισδιάστατων στοιχείων είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν αν γινόταν χρήση δισδιάστατων στοιχείων, αυξάνοντας έτσι τον χρόνο υπολογισμού.

### Ανάλυση πλέγματος (3-2-20/3.5)

1. Το μοντέλο θα πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα στοιχεία που συμμετέχουν στην κατανομή των φορτίσεων.
2. Για το στοιχείο ράβδος, το πλάτος δεν θα πρέπει να ξεπερνά είτε το άθροισμα των ημιαποστάσεων σε κάθε πλευρά του κατασκευαστικού στοιχείου είτε το 1/3 του ανυποστήρικτου μήκους, όποιο είναι μικρότερο.
3. Για το στοιχείο πλάκα, οι διαστάσεις του πλέγματος θα πρέπει να είναι ανάλογες και να παρουσιάζουν την συνολική ακαμψία του κατασκευαστικού στοιχείου που αναπαριστά. Για την ανάλυση μεγάλων επιφανειών όπως κατάστρωμα ή φρακτές, οι διαστάσεις του πλέγματος δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από τις αποστάσεις των νομέων ή ενισχυτικών. Το πλέγμα μπορεί να βελτιστοποιηθεί αν πρέπει να αναλυθούν απαραίτητες κατασκευαστικές λεπτομέρειες.
4. Τουλάχιστον τρία στοιχεία πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση πρωτευόντων κατασκευαστικών στοιχείων και ενισχυτικών. Επίσης, το στοιχείο γραμμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις φλάντζες των κύριων ενισχυτικών και για αγκώνες σύνδεσης.
5. Για τα δισδιάστατα στοιχεία (plate elements), ο λόγος των πλευρών δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 3.
6. Η χρήση τριγωνικών στοιχείων θα πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο δυνατόν.
7. Τυχόν ασυνέχειες που προκαλούν συγκέντρωση τάσεων (π.χ. διατρήσεις) θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν.
8. Τα στοιχεία κελύφη πρέπει να χρησιμοποιούνται αντί για τα στοιχεία πλάκα σε πλάγιες φορτίσεις.

### Οριακές Συνθήκες (3-2-20/5)

Οι οριακές συνθήκες που θα οριστούν θα πρέπει να αναπαριστούν τις πραγματικές συνθήκες στήριξης της κατασκευής. Αν το μοντέλο εκτείνεται πέρα από το σημείο ενδιαφέροντος, οι οριακές συνθήκες μπορούν να απλοποιηθούν. Αν δημιουργηθεί τοπικά ένα ξεχωριστό μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων με αναλυτικό πλέγμα για την μελέτη τοπικών τάσεων, οι οριακές συνθήκες αυτού θα πρέπει να εναρμονίζονται με τις οριακές συνθήκες του αρχικού και μεγαλύτερου μοντέλου.

### Φορτίσεις (3-2-20/7)

Μπορούν να συμπεριληφθούν στατικές και δυναμικές φορτίσεις. Δεν είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψιν το βάρος της κατασκευής εκτός αν πρόκειται για σημαντικό μέρος των φορτίσεων. Τα φορτία θα πρέπει να ασκηθούν και να κατανεμηθούν όσο πιο ρεαλιστικά γίνεται.



### Επιτρεπόμενες Τάσεις (3-2-20/9)

Οι τάσεις ή συνδυασμός αυτών που ασκούνται σε μοντέλα δεν θα πρέπει να ξεπερνούν την επιτρεπόμενη τάση  $F$  που ορίζεται από τον τύπο:

$$F = F_y/FS$$

Όπου,

$F_y$  = το ελάχιστο όριο διαρροής του υλικού.

$FS$  = συντελεστής ασφαλείας.

Για στατικές φορτίσεις

= 1.67 για αξονικές ή καμπτικές τάσεις.

= 2.50 για τέμνουσες τάσεις.

Για φορτίσεις που συνδυάζουν στατικά και δυναμικά φορτία

= 1.25 για αξονικές ή καμπτικές τάσεις.

= 1.88 για τέμνουσες τάσεις.

Η τάση Von-Mises, σε μοντέλα πλάκας, δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα όρια σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

Μέγεθος Πλέγματος	Όρια Τάσης	
	Στατικές + Δυναμικές Φορτίσεις	Στατικές Φορτίσεις
1 x ισαπόσταση ενισχυτικών (SS)	0.90 $S_m F_y$	0.63 $S_m F_y$
1/2 x SS	0.95 $S_m F_y$	0.67 $S_m F_y$
1/3 x SS	1.00 $S_m F_y$	0.70 $S_m F_y$
1/4 x SS	1.06 $S_m F_y$	0.74 $S_m F_y$
1/5 x SS ~ 1/10 x SS	1.12 $S_m F_y$	0.78 $S_m F_y$
1/10 x SS ~ t	1.18 $S_m F_y$	0.82 $S_m F_y$

Με

$t$  = πάχος ελάσματος

$S_m$  = 1.0 για mild steel

= 0.95 για HT 32

= 0.908 για HT 36

= 0.875 για HT 40

## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

#### 2.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Η Μηχανική του Παραμορφώσιμου Σώματος είναι ο κλάδος της επιστήμης της Μηχανικής που μελετά την συμπεριφορά στερεών σωμάτων τα οποία παραμορφώνονται υπό την επίδραση φορτίσεων, δηλαδή μεταβάλλουν την αρχική τους μορφή. Σε αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνεται η Θεωρία Ελαστικότητας η οποία, σε αντίθεση με την Αντοχή των Υλικών που υποδεικνύει αναλυτικές μεθόδους για τον υπολογισμό της αντοχής μιας κατασκευής, περιγράφει το παραπάνω φαινόμενο από αυστηρή μαθηματική σκοπιά. Συγκεκριμένα, αναφέρεται στην συμπεριφορά του στερεού σώματος υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίσεων (δυνάμεις, ροπές) όταν αυτό θεωρηθεί συνεχές, ομογενές, ισότροπο και ελαστικό.

#### Είδη Φορτίων

Τα φορτία είναι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε μία κατασκευή και διακρίνονται σε :

- Ημιστατικά φορτία: Αυξάνονται με σταθερό ρυθμό συναρτήσει του χρόνου και στην συνέχεια αποσβένουν.
- Μόνιμα φορτία: Ασκούνται μόνιμα σε μία κατασκευή (βάρος).
- Κρουστικά φορτία: Ασκούνται απότομα στην κατασκευή με όλη τους την ένταση.
- Εναλλασσόμενα φορτία: Μεταβάλλονται στον χρόνο.

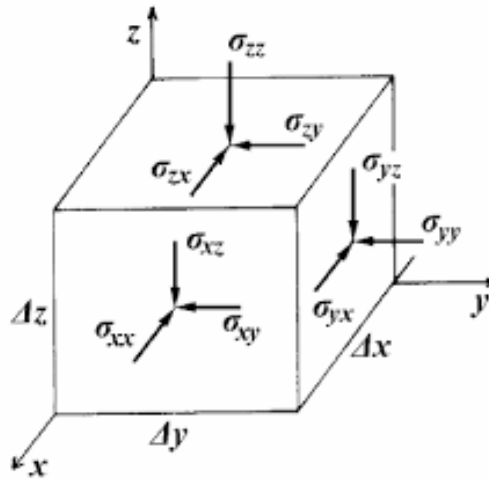
Τα εξωτερικά φορτία χωρίζονται σε συγκεντρωμένα (ασκούνται σε ένα σημείο στην επιφάνεια του φορέα) και σε κατανεμημένα (ασκούνται καθ'όλη την επιφάνεια του φορέα).

#### Τανυστής Τάσεων

Τανυστής τάσεων  $\Sigma$  (stress tensor) ονομάζεται το μητρώο το οποίο εκφράζει όλες τις γνωστές ορθές και διατμητικές τάσεις ( $\sigma, \tau$ ) ενός σώματος σε τριαξονική καταπόνηση (σύστημα αξόνων Oxyz). Προσδιορίζει με ακρίβεια την εντατική κατάσταση (state of stress) μέσα στο υλικό και σε οποιοδήποτε σημείο του στην παραμορφωμένη κατάσταση. Η τάση σε τυχαίο σημείο του σώματος ορίζεται από τρία διανύσματα και η ορισμένη τάση αποτελεί τανυστή δεύτερης τάξης.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Ο πρώτος δείκτης (i) δείχνει τον άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο πάνω στο οποίο ασκείται η τάση και ο δεύτερος δείκτης (j) δείχνει τον άξονα με τον οποίο η συνιστώσα της τάσης είναι παράλληλη.



Εικόνα 7. Οι συνιστώσες της τάσης – τανυστής τάσεων.

## 2.1.2 ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

Κάμψη ονομάζεται το φαινόμενο όπου ασκούνται κάθετες δυνάμεις σε ένα μακρόστενο σώμα ή πλάκα δημιουργώντας καμπτικές ροπές. Τα αποτελέσματα του φαινομένου και η συμπεριφορά του στοιχείου μοιάζουν με το λυγισμό, με την διαφορά πως στον λυγισμό οι δυνάμεις ασκούνται παράλληλα με τον άξονα, ενώ στην κάμψη οι δυνάμεις ασκούνται κάθετα στον άξονα.

Σε ένα τυχαίο σημείο που υφίσταται ροπή κάμψης  $M$ , αναπτύσσεται ορθή τάση που δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma = \frac{M}{I_x} y$$

Όπου,

$M$  = Η καμπτική ροπή που ασκείται στη διατομή.

$I_x$  = Η ροπή αδρανείας της διατομής ως προς τον ουδέτερο άξονα.

$y$  = Η απόσταση του σημείου από τον ουδέτερο άξονα.

### Βέλος Κάμψης

Βέλος κάμψης ονομάζεται η προκαλούμενη παραμόρφωση ενός στοιχείου όταν αυτό υπόκειται σε κάμψη. Πιο συγκεκριμένα, όταν σε ένα σώμα ασκείται κάθετη δύναμη, αυτό παραμορφώνεται, και κάθε ένα από τα δομικά του μόρια μετατοπίζεται σε μια νέα θέση. Η απόσταση μεταξύ της αρχικής και τελικής θέσης ονομάζεται βέλος κάμψης. Επίσης, το σχήμα του νέου (παραμορφωμένου) άξονα του σώματος ονομάζεται ελαστική γραμμή.

Για παράδειγμα, το μέγιστο βέλος κάμψης σε μία πρόβολο με πακτωμένο το ένα άκρο και ελεύθερο το άλλο, θα εμφανίζεται στο τελευταίο σημείο του ελεύθερου άκρου.



Εικόνα 8. Μέγιστο βέλος κάμψης σε πρόβολο.

### Ουδέτερος Άξονας

Ουδέτερος άξονας (neutral axis) μιας τομής ενός πλοίου ή κατασκευαστικού στοιχείου, ονομάζεται ο άξονας (γεωμετρικός τόπος) στον οποίο υπάρχει μηδενική τάση. Ο άξονας αυτός διέρχεται από το κέντρο βάρους της διατομής. Για διατομή με ενισχυτικά και ελάσματα μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$NA = \frac{\sum A * h}{\sum A}$$

Όπου,

A = εμβαδόν

h = απόσταση από την γραμμή αναφοράς κάθε στοιχείου.

### Ροπή Αντίστασης SM (Section Modulus)

Η ροπή αντίστασης είναι μια γεωμετρική ιδιότητα του υλικού που συνδέει τις τάσεις με τις ροπές κατά την κάμψη. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, για δεδομένη διατομή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ροπή που μπορεί να αντέξει ο φορέας για δεδομένη τάση. Για τον λόγο αυτό, οι κανονισμοί δίνουν την ελάχιστη ροπή αντίστασης.

$$SM = \frac{I_x}{y_{max}}$$

Όπου,

$I_x$  = Η ροπή αδρανείας της διατομής ως προς τον ουδέτερο άξονα.

$y_{max}$  = Η απόσταση της ακραίας ίνας από τον ουδέτερο άξονα.

### 2.1.3 ΤΑΣΗ VON MISES

Τα υλικά που συναντώνται στην φύση, όταν σε αυτά ασκηθεί μια οποιαδήποτε δύναμη, παραμορφώνονται ή σπάνε. Οι καταστάσεις αυτές ονομάζονται οριακές εντατικές καταστάσεις. Ως οριακή εντατική κατάσταση μπορεί να θεωρηθεί η διαρροή ή η θραύση ενός υλικού και αυτές οι καταστάσεις προσδιορίζονται με σχετική ευκολία όταν η μορφή καταπόνησης είναι μοναδική όπως ο εφελκυσμός ή η θλίψη. Στις συγκεκριμένες καταπονήσεις, για παράδειγμα, η περιγραφή του φαινομένου γίνεται από την τιμή της ορθής τάσης λόγω εφελκυσμού ή θλίψης αντίστοιχα χωρίς περεταίρω δυσκολία ή πολυπλοκότητα.

Αντίθετα, στις σύνθετες καταπονήσεις το φαινόμενο περιπλέκεται και η αστοχία μπορεί να περιγραφεί μέσα από τον υπολογισμό διαφόρων τάσεων, ορθών ή διατμητικών, που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Με άλλα λόγια, η αστοχία μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει πολλών τάσεων. Για τον λόγο αυτό, δημιουργήθηκαν αντίστοιχα κριτήρια αστοχίας που συσχετίζουν την αντοχή του υλικού υπό σύνθετη καταπόνηση με την αντοχή του ίδιου, αν αυτό υποβαλλόταν σε απλή καταπόνηση. Σύμφωνα με τα κριτήρια αυτά, η τρι-αξονική εντατική κατάσταση ανάγεται σε μία ισοδύναμη μονό-αξονική εντατική κατάσταση όμοιας έντασης. Τα κυριότερα κριτήρια αστοχίας είναι:

- 1) Κριτήριο Μέγιστης Διατμητικής Τάσης (Tresca): Η διαρροή επέρχεται λόγω ολίσθησης κατά τη διεύθυνση της μέγιστης διατμητικής τάσης και θα πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

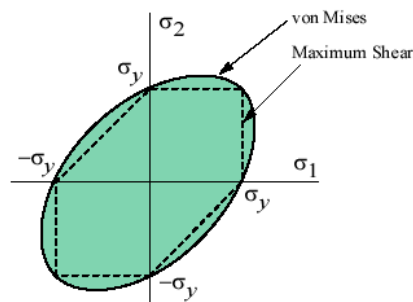
$$|\sigma_1| \leq \sigma_y, \quad |\sigma_2| \leq \sigma_y, \quad |\sigma_1 - \sigma_2| \leq \sigma_y$$

- 2) Κριτήριο Στροφικής Ενέργειας (Von Mises): Η διαρροή ενός υλικού ξεκινά όταν η στροφική ενέργεια που αναπτύσσεται στην σύνθετη εντατική κατάσταση γίνει ίση με την στροφική ενέργεια που αναπτύσσεται κατά τη διαρροή του υλικού, αν αυτό υποβαλλόταν σε καθαρό εφελκυσμό. Στροφική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που απαιτείται για να αλλάξει το παραμορφωμένο σώμα μόνο σχήμα. Θα πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \leq \sigma_y^2$$

Και η τάση Von Mises:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} + 3\tau_{xy}^2}$$



Εικόνα 9. Γεωμετρική αναπαράσταση του τύπου της τάσης Von Mises.

## 2.2 ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

### Ορισμός

Ένα ρευστό όταν περιορισθεί μέσα σε στερεά όρια (τοιχώματα) εξασκεί κάθετες δυνάμεις πάνω στις επιφάνειες που το περικλείουν. Η κάθετη δύναμη αυτή ονομάζεται υδροστατική πίεση και παριστάνεται με το σύμβολο  $P$ . Η υδροστατική πίεση δεν εξαρτάται από το σχήμα του χώρου (όγκος) στο οποίο βρίσκεται το υγρό. Είναι μονόμετρο φυσικό μέγεθος και έχει μέτρο το πηλίκο του βάρους του υγρού  $W_{\text{υγρ}}$  που ενεργεί κάθετα στην επιφάνεια προς το εμβαδό  $S$  της επιφάνειας αυτής και δίνεται από τον γενικό τύπο:

$$P_h = \frac{W_{\text{υγρ}}}{S}$$

Μονάδα μέτρησης στο S.I.:  $\text{N/mm}^2$  (Pa)

### Νόμος Υδροστατικής Πίεσης

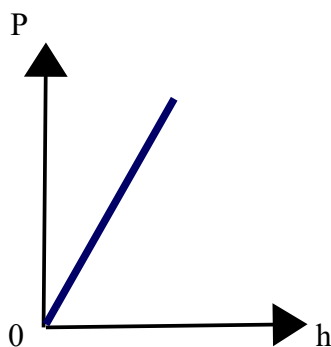
Τα μεγέθη από τα οποία εξαρτάται η υδροστατική πίεση είναι η πυκνότητα  $\rho$  του υγρού, το απόλυτο βάθος  $h$  του νερού και η επιτάχυνση  $g$  της βαρύτητας. Συνεπώς, μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$P_h = \rho gh$$

Οι κανονισμοί ορίζουν ως τελική πίεση που θα ασκείται σε οποιαδήποτε επιφάνεια το άθροισμα της υδροστατικής και ατμοσφαιρικής πίεσης  $p_a$ . Συνεπώς θα έχω:

$$P = \rho gh + p_a$$

Η γραφική παράσταση της υδροστατικής πίεσης συναρτήσει του βάθους  $h$  είναι μια ημι-ευθεία με αρχή την αρχή των αξόνων.



Διάγραμμα 1. Υδροστατική πίεση  $P$  συναρτήσει του βάθους  $h$  του νερού.

### Κέντρο Πίεσης

Το σημείο εφαρμογής της συνισταμένης δύναμης των υδροστατικών πιέσεων ονομάζεται κέντρο πίεσης. Το κέντρο πίεσης στην περίπτωση των κεκλιμένων επιπέδων επιφανειών δεν συμπίπτει με το κέντρο βάρους της επιφάνειας, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των οριζόντιων επιφανειών. Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων του κέντρου πίεσης, παίρνονται οι ροπές της συνισταμένης δύναμης των πιέσεων  $P$  και εξισώνονται με τα αθροίσματα (ολοκληρώματα) των ροπών των συνιστωσών στοιχειωδών δυνάμεων πιέσεων ως προς τους άξονες  $x$  και  $y$ .

## 2.3 ΚΑΜΨΗ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ

Η προσέγγιση του φαινομένου της κάμψης σε ελάσματα με ενισχυτικά μπορεί να πραγματοποιηθεί κάνοντας χρήση των διαγραμμάτων του Schade, όπου μπορούν να υπολογισθούν προσεγγιστικά οι μέγιστες τάσεις και μετατοπίσεις που εμφανίζονται στο έλασμα υπό ομοιόμορφα κατανεμημένο κάθετο φορτίο. Η ενίσχυση της πρωραίας υδατοστεγούς φρακτής συγκρούσεως αποτελείται από πολλά διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά που τέμνονται κάθετα (Cross-stiffening) και η μεθοδολογία αυτή αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο.

Θα πρέπει να αναφερθεί πως η σύγκριση των αποτελεσμάτων με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, μέσω των τάσεων, δεν είναι σωστή λόγω των συγκεντρώσεων αυτών που αλλάζουν ανάλογα με το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος. Δηλαδή, σε διαφορετικά μεγέθη στοιχείων έχουμε και διαφορετική συγκέντρωση τάσεων με αποτέλεσμα οι τιμές να διαφέρουν μεταξύ των μεθόδων. Ως εκ τούτου, το βέλος κάμψης αποτελεί το μέγεθος όπου θα χρησιμοποιηθεί για την συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τύπος του βέλους κάμψης για σταυροειδή ενίσχυση (Type A-Cross Stiffening).

### Βέλος κάμψης στο κέντρο του ελάσματος

Το βέλος κάμψης στο κέντρο ενισχυμένου ελάσματος δίνεται από τον τύπο:

$$w = k \frac{pb^4}{Ei_b}$$

Όπου,

$k$  = συντελεστής από διάγραμμα Schade για βέλος κάμψης.

$p$  = το ασκούμενο φορτίο.

$b$  = το πλάτος του ελάσματος.

$E$  = το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

$$i_b = \frac{I_{nb}}{S_b} + 2 \left( \frac{I_b - I_{nb}}{a} \right)$$

Με,

$I_{nb}$  = η ροπή αδράνειας των κοντών ενισχυτικών μαζί με το πλάτος του συνεργαζόμενου ελάσματος, εκτός του κεντρικού ενισχυτικού.

$S_b$  = η ισαπόσταση των κοντών ενισχυτικών.

$I_b$  = Η ροπή αδράνειας του κεντρικού κοντού ενισχυτικού μαζί με το πλάτος του συνεργαζόμενου ελάσματος.

$a$  = το μήκος του ελάσματος.

### 3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων είναι μια ανεπτυγμένη αριθμητική μέθοδος η οποία αποσκοπεί στην επίλυση προβλημάτων Μηχανικής με αυξημένες απαιτήσεις, τα οποία είναι σχεδόν αδύνατον να υπολογιστούν με τους κλασικούς τρόπους επίλυσης. Τα προβλήματα αυτά συνήθως αποτελούνται από περίπλοκες γεωμετρίες, σύνθετες μηχανικές ιδιότητες και πολύπλοκες φορτίσεις. Πιο συγκεκριμένα, είναι μια μητρική μέθοδος προσομοίωσης των καταπονήσεων που ασκούνται στην πραγματική κατασκευή και προσφέρει ακρίβεια υπολογισμών των τάσεων και παραμορφώσεων του υπό εξέταση μοντέλου καθώς ανιχνεύει επικίνδυνες περιοχές που μπορεί να καταρρεύσουν λόγω αυξημένων φορτίσεων. Για την ανάλυση χρησιμοποιούνται ειδικά λογισμικά που δημιουργούν ένα πολύ πυκνό πλέγμα στο μοντέλο με σκοπό την εύρεση των κρίσιμων περιοχών αυτών. Η διαδικασία αυτή είναι επαναληπτική. Στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό ANSYS.

Για να γίνει χρήση μητρικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις. Με τον τρόπο αυτό οι μοναδικοί άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ' όλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων, ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρικές) μεθόδους. Για να επιτευχθεί ακριβής λύση ενός προβλήματος στη διακριτοποιημένη μορφή του, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβιβαστότητας στο εσωτερικό των στοιχείων αλλά και στα σύνορά τους.

Χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την ανάλυση και προσομοίωση συνεχών μέσων τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Σε μία συνεχή κατασκευή όμως δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία ή αλλιώς πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα. Η ακρίβεια της μεθόδου αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων (κόμβων). Όμως, όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων τόσο αυξάνεται ο χρόνος υπολογισμού και το κόστος.

Η συμπεριφορά των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τον τρόπο μεταβολής των τάσεων ή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό τους. Με άλλα λόγια, προκαθορίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς των διαφόρων μεταβλητών. Το αποτέλεσμα είναι ότι, παρ' όλο που οι συνθήκες ισορροπίας και συμβιβαστότητας ικανοποιούνται μόνο στους κόμβους, η προδιαγεγραμμένη συμπεριφορά στο εσωτερικό κάθε στοιχείου εξασφαλίζει ότι η συμβιβαστότητα ικανοποιείται επαρκώς στο εσωτερικό και στα σύνορά τους. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι απαιτείται προσοχή κατά την υποδιαίρεση (διακριτοποίηση) της κατασκευής, καθώς επίσης και κατά την επιλογή της συνάρτησης που περιγράφει τη συμπεριφορά στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου.

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος διατύπωσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για γραμμικά στατικά προβλήματα βασίζεται στη μέθοδο των μετατοπίσεων. Άλλοι τρόποι κάνουν χρήση της ισορροπίας δυνάμεων, ή άλλων υβριδικών ή και μικτών μεθόδων.



## 3.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Τα Πεπερασμένα Στοιχεία ξεκινούν ως ιδέα που χρονολογείται από τα αρχαία χρόνια, όταν ο Αρχιμήδης προσπάθησε να ορίσει προσεγγιστικά την τιμή του  $\pi$ , εγκλείοντας το τεταρτημόριο ενός κύκλου με εγγεγραμμένα και περιγεγραμμένα πολύγωνα, των οποίων οι πλευρές ήταν προσεγγίσεις του τόξου του κύκλου. Έγινε δηλαδή μια πρώτη τμηματική προσέγγιση ενός γεωμετρικού τόπου. Πάνω στην ιδέα αυτή βασίστηκε και η ιδέα της τμηματικής προσέγγισης της λύσης μιας διαφορικής εξίσωσης μερικών παραγώγων, στην οποία βασίζονται τα ΠΣ, που περιγράφει την συμπεριφορά μιας κατασκευής. Γενικότερα, η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων ορίστηκε για πρώτη φορά από τους Alexander Hrennikoff και Richard Courant τη δεκαετία του 40.

Η πρώτη τεκμηριωμένη αναφορά της μεθόδου έγινε από τον Hrennikoff και αναφερόταν σε συνεχές ελαστικό μέσο το οποίο αναπαρίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό στοιχείων. Το 1950 και με την ύπαρξη των πρώτων υπολογιστών, δόθηκε η δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων πολλαπλών εξισώσεων ενώ το 1955 ο Έλληνας μαθηματικός Ιωάννης Αργύρης θεμελίωσε την μέθοδο μέσω συσχετισμού με διαφορετικές ισοδύναμες θεωρήσεις. Αργότερα, το 1960, διατυπώθηκε ο όρος « Πεπερασμένα Στοιχεία » από τον Ray W. Clough ενώ το 1965 πραγματοποιήθηκε το πρώτο επιστημονικό συνέδριο με αντικείμενο την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Το 1967 εκδόθηκε το πρώτο βιβλίο αναφερόμενο στη μέθοδο των ΠΣ από τον Zienkiewicz. Όσον αφορά στην ανάπτυξη της μεθόδου, αυτή έγινε στις αρχές της δεκαετίας του 70 και άρχισε να χρησιμοποιείται σε σύνθετα προβλήματα μηχανικής. Την περίοδο εκείνη κάνουν την εμφάνισή τους και τα πρώτα λογισμικά που χρησιμοποιούν την ΜΠΣ και η διάδοσή τους γίνεται ταχύτατα (ABAQUS, NASTRAN, ANSYS).

Κατά τη δεκαετία του '80 η μέθοδος αρχίζει και χρησιμοποιείται σε όλο το φάσμα της μηχανικής επιστήμης και σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους (π.χ. Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Ηλεκτρομαγνητισμός, Μετάδοση Θερμότητας κλπ). Στην πραγματικότητα, η ΜΠΣ αναπτύχθηκε με ραγδαίους ρυθμούς την δεκαετία του 90, ταυτόχρονα με την ανάπτυξη των υπολογιστών και παγιώθηκε ως μέθοδος επίλυσης προβλημάτων μηχανικής.

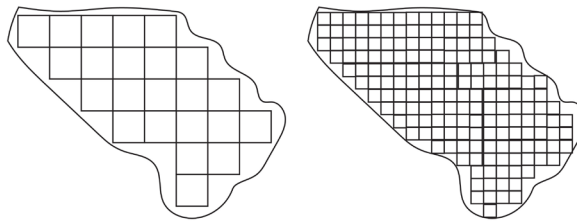
Σήμερα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει φτάσει σε πολύ εξελιγμένο επίπεδο ανάπτυξης, που εφαρμόζεται σε ένα μεγάλο σύνολο προβλημάτων Μηχανικής. Παρ'όλη τη δυσκολία που υπάρχει ως προς τη χρήση και εφαρμογή της μεθόδου μέσω των διάφορων εμπορικών λογισμικών, γίνεται μια προσπάθεια να δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στην βελτίωση του κώδικα ώστε να είναι πιο φιλικός στο χρήστη και στη βελτίωση του σχεδιαστικού περιβάλλοντος για πιο εύκολη και άμεση χρήση.

Σύμφωνα με τον Clough (1975) υπάρχουν πέντε ισοδύναμοι μέθοδοι που διατυπώνουν την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

- 1) Η Αρχή των Δυνατών Έργων.
- 2) Η Ελαχιστοποίηση της Ολικής Ενέργειας.
- 3) Η Μέθοδος Galerkin.
- 4) Η Αρχή του Hamilton.
- 5) Η Μέθοδος των εξισώσεων Lagrange.

### 3.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Η μέθοδος των Πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων συνοριακών τιμών. Οι συνοριακές τιμές ονομάζονται και πεδιακά προβλήματα, όπως είναι τα προβλήματα βαρύτητας, ροής, θερμότητας κ.α, και σκοπός είναι η εύρεση και η λύση μιας συνάρτησης σε όλη την έκταση του πεδίου του προβλήματος. Ως πεδίο ονομάζεται το χωρίο στο οποίο περικλείεται το πρόβλημα το οποίο είναι υπό μελέτη, είτε μιλάμε για στερεό είτε για ρευστό.



Εικόνα 10. Χωρίο (πεδίο) διακριτοποιημένο σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων.

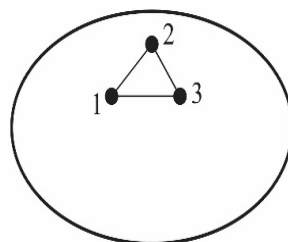
Κάθε πρόβλημα περιγράφεται από εξισώσεις οι οποίες θα πρέπει να λυθούν για να καταλήξουμε σε αποτέλεσμα. Οι εξισώσεις αυτές περιέχουν κάποιες μεταβλητές οι οποίες ονομάζονται εξαρτημένες ή πεδιακές και υπεισέρχονται στην λύση της εξίσωσης.

Στην ΜΠΣ, το χωρίο διακριτοποιείται σε ένα σύνολο πεπερασμένων στοιχείων και η συνάρτηση του πεδίου εκφράζεται συναρτήσει των τιμών στους κόμβους των στοιχείων. Οι κόμβοι είναι σημεία του στοιχείου όπου υπολογίζεται η πεδιακή μεταβλητή. Στην προσέγγιση των πεπερασμένων στοιχείων, οι τιμές των κόμβων θεωρούνται άγνωστες σταθερές και οι εξισώσεις παρεμβολής είναι πολυονυμικής μορφής των ανεξάρτητων μεταβλητών με στόχο την ικανοποίηση απαιτήσεων στους κόμβους. Στα ΠΣ, οι συναρτήσεις σχήματος περιγράφουν την κατανομή της πεδιακής μεταβλητής σε κάθε σημείο εσωτερικά του στοιχείου και η μορφή τους είναι προεπιλεγμένη.

#### Βαθμοί ελευθερίας

Ως βαθμός ελευθερίας ενός στοιχείου αποκαλείται το γινόμενο του αριθμού των κόμβων του επί των αριθμό των τιμών που μπορεί να λάβει η πεδιακή μεταβλητή (παράγωγοι) σε κάθε κόμβο για να περιγραφεί το στοιχείο.

Παράδειγμα.



Εικόνα 11. Τριγωνικό στοιχείο.

Το παραπάνω τριγωνικό στοιχείο 123 περιγράφεται από την εξίσωση:

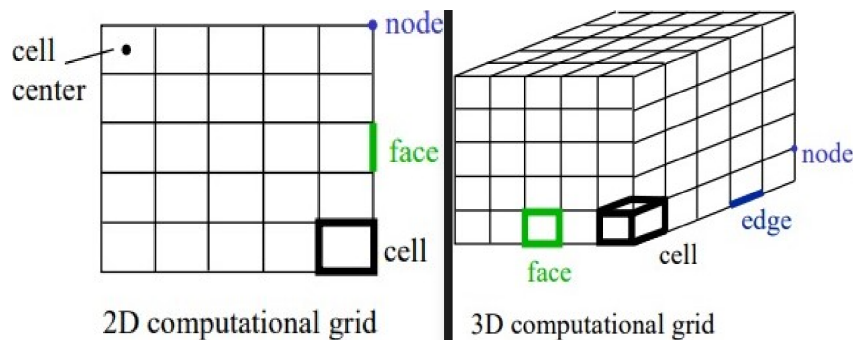
$$\varphi(x, y) = N_1(x, y)\varphi_1 + N_2(x, y)\varphi_2 + N_3(x, y)\varphi_3$$

Λέμε ότι το στοιχείο έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας διότι χρειάζονται τρεις τιμές των κόμβων για να περιγραφεί πλήρως.

## Ορολογία

Ένα πλέγμα διακριτοποιημένου χωρίου που δημιουργείται από πεπερασμένο αριθμό στοιχείων αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία.

- Το κελί (cell) = είναι το γεωμετρικό σχήμα με το οποίο χωρίστηκε το χωρίο.
- Το κέντρο του κελιού (cell center) = είναι το κέντρο βάρους του κελιού.
- Το κόμβο (node) = είναι το σημείο συνάντησης δύο κελιών.
- Την ακμή (edge) = είναι το όριο ενός προσώπου.
- Το πρόσωπο (face) = είναι το όριο ενός κελιού.
- Τη ζώνη (zone) = είναι μία ομάδα κελιών, κόμβων ή προσώπων.
- Το τομέα (domain) = είναι μία ομάδα ζωνών.



Εικόνα 12. Βασικές έννοιες του πλέγματος.

## Ιδιότητες υλικών

Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι ο καθορισμός των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένο το υπό μελέτη στοιχείο. Τα βασικά στοιχεία που καθορίζονται είναι η πυκνότητα  $\rho$  και το ειδικό βάρος  $\gamma$  του υλικού, το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , ο λόγος Poisson και ο συντελεστής θερμικής διαστολής  $\alpha$  (μόνο σε προβλήματα με θερμοκρασιακές μεταβολές). Τα προβλήματα που εξετάζονται μπορεί να περιλαμβάνουν μεταλλικά ή μη-μεταλλικά υλικά (πολυμερή, κεραμικά, σύνθετα).

## Πυκνότητα πλέγματος

Με τον όρο πυκνότητα του πλέγματος ορίζουμε τον αριθμό των μικρότερων γεωμετρικών στοιχείων από το οποίο αποτελείται η βασική γεωμετρία. Οι παράγοντες που επηρεάζονται είναι οι εξής:

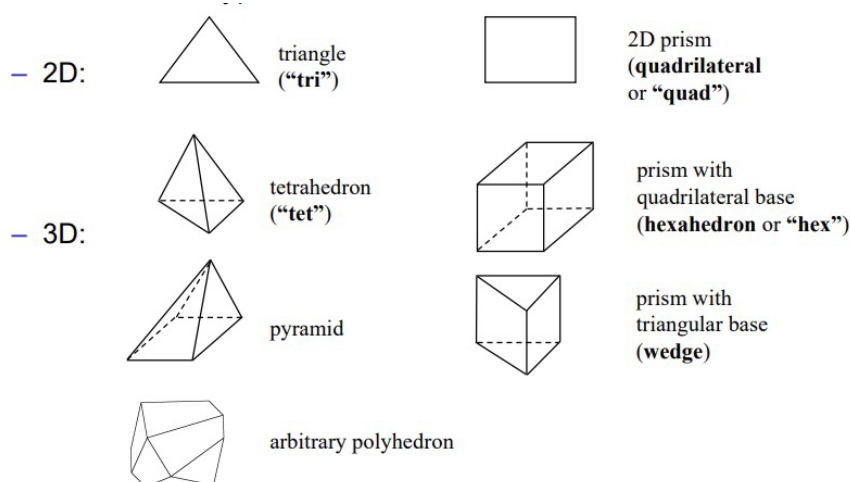
- 1) Το ποσοστό της κάλυψης ή έλλειψης.
- 2) Η ακρίβεια της λύσης.
- 3) Την καθυστέρηση σε χρόνο του επεξεργαστή για την επίλυση του προβλήματος.

Η πυκνότητα του πλέγματος έχει σημασία για την ποιότητα της διακριτοποίησης και για την ακρίβεια της λύσης του προβλήματος.

## Γεωμετρία

Αποτελεί το αρχικό στάδιο της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων και περιγράφει σχηματικά το πρόβλημα. Η γεωμετρία δύναται να είναι γραμμές, καμπύλες, όγκοι ή επιφάνειες και κυμαίνονται από απλές έως σύνθετες. Όσον αφορά την μέθοδο δημιουργίας της γεωμετρίας, αυτή μπορεί να γίνει είτε με την τεχνική top-down σε κάποιο σχεδιαστικό εργαλείο είτε με την bottom-up στον ίδιο επεξεργαστή του λογισμικού. Top-down είναι η τεχνική όπου οι γεωμετρίες που μελετώνται κατασκευάζονται από λογικές εργασίες χρησιμοποιώντας θεμελιώδη σχήματα όπως κύλινδροι, παραλληλεπίπεδα και σφαίρες. Αντίθετα, Bottom-up είναι η διαδικασία όπου αρχικά δημιουργούνται σημεία και στη συνέχεια γραμμές που τα ενώνουν και συνδέονται μεταξύ τους για να δημιουργηθούν επιφάνειες. Από τις επιφάνειες προκύπτουν οι όγκοι. Τα πιο συνηθισμένα γεωμετρικά σχήματα των στοιχείων είναι:

- Τρίγωνο (triangle)
- Πρίσμα (quad)
- Τετράεδρο (tetrahedron)
- Εξάεδρο (hexahedron)
- Πυραμίδα (pyramid)
- Τριγωνικό πρίσμα (wedge)
- Πολύεδρο (polyhedron)



Εικόνα 13. Τυπικές γεωμετρίες του πλέγματος σε δύο και τρεις διαστάσεις.

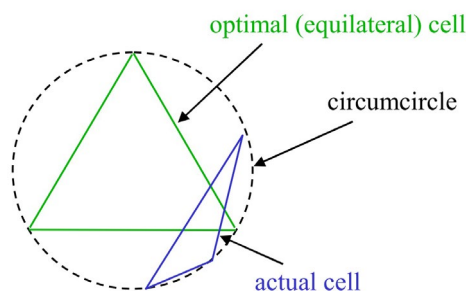
## Διακριτοποίηση

Όπως προαναφέρθηκε, η διακριτοποίηση είναι βασικό μέρος της διαδικασίας της μεθόδου και με την οποία μία μεγαλύτερη γεωμετρία χωρίζεται σε μικρότερες γεωμετρίες. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο διακριτοποίηση ονομάζουμε την διαίρεση της αρχικής γεωμετρίας σε πεπερασμένα γεωμετρικά στοιχεία, έτσι ώστε να σχηματίζουν μια διακριτή αναπαράσταση της αρχικής γεωμετρίας του προβλήματος. Δημιουργείται, ουσιαστικά, ένα πλέγμα με συγκεκριμένα γεωμετρικά στοιχεία και ορισμένη πυκνότητα. Επίσης, τα στοιχεία δύναται να ομαδοποιηθούν σε ορισμένες ζώνες έτσι ώστε να εφαρμόζονται κατάλληλα οι οριακές συνθήκες. Η διακριτοποίηση χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

- Διακριτοποίηση με την χρήση τριγωνικών στοιχείων (Tri mesh).
- Διακριτοποίηση με την χρήση τετραγωνικών στοιχείων (Quad mesh).
- Διακριτοποίηση με την χρήση εξαεδρικών στοιχείων (Hex mesh).
- Διακριτοποίηση με την χρήση τετραεδρικών στοιχείων (Tet mesh).
- Υβριδική διακριτοποίηση (Hybrid mesh)
  - Χρήση τριγωνικών και τετραγωνικών στοιχείων για δισδιάστατα (2D) προβλήματα.
  - Χρήση τετραέδρων, πρισμάτων και πυραμίδων για τρισδιάστατα (3D) προβλήματα.
  - Χρήση πρισμάτων στα τοιχώματα και τετράεδρα εσωτερικά (Boundary layer mesh).
  - Χρήση εξαέδρων στο κέντρο και οποιοδήποτε άλλων στοιχείων στα τοιχώματα (Hexcore mesh).
- Διακριτοποίηση με την χρήση αυθαίρετων πολυέδρων (Polyhedral mesh).
- Τυχαία διακριτοποίηση με την χρήση αυθαίρετων σχημάτων από το λογισμικό.

## Έλεγχος διακριτοποίησης

Υπάρχουν τρία κριτήρια ελέγχου της ποιότητας της διακριτοποίησης. Αρχικά είναι η στρέβλωση (skewness) δηλαδή η απόκλιση των πλευρών από το αρχικό τους ορθολογικό σχήμα (για τρίγωνα το ισόπλευρο, για τετράγωνα το ορθογώνιο κτλπ), η ομαλότητα (smoothness) δηλαδή η μικρή αλλαγή μεγέθους και ο λόγος διαστάσεων (aspect ratio) δηλαδή λόγος του μήκους της μεγάλης πλευράς προς το μήκος της μικρής πλευράς (ιδανικά 1). Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι όσο αυξάνεται η πυκνότητα της διακριτοποίησης τόσο αυξάνεται και η ακρίβεια της λύσης. Για παράδειγμα, για τον ίδιο αριθμό στοιχείων του πλέγματος, η διακριτοποίηση με εξαεδρικά στοιχεία (hex mesh) θα δώσει πιο ακριβείς λύσεις σε σχέση με τα τετραεδρικά στοιχεία (quad mesh).



Εικόνα 14. Παράδειγμα στρέβλωσης τριγωνικού στοιχείου.

## Οριακές συνθήκες

Εάν υποθέσουμε ότι ένα σώμα φέρει φορτία τα οποία δεν ισορροπούν, το σώμα θα φέρει μία συνιστώσα φόρτιση. Αν το σώμα δε στηρίζεται επαρκώς, θα προκύψουν γενικευμένες επιταχύνσεις στο χώρο, δηλαδή κίνηση άκαμπτου σώματος με αποτέλεσμα να μην αναπτυχθούν εσωτερικά εντατικά πεδία μετατοπίσεων και τάσεων. Για τον λόγο αυτό, το σώμα θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από οριακές συνθήκες. Ως οριακές συνθήκες ονομάζονται οι μαθηματικές συνθήκες που επικρατούν στα σύνορα του υπό εξέταση σώματος (πεδίου) και θα πρέπει να ικανοποιούν οι εξαρτημένες μεταβλητές του προβλήματος. Για να επιλυθεί συνεπώς το στατικό πρόβλημα θα πρέπει να επιβληθούν κατάλληλες συνοριακές συνθήκες έτσι ώστε να αποφευχθεί η κίνηση άκαμπτου σώματος. Στη ΜΠΣ οι οριακές συνθήκες επιβάλλονται ως προκαθορισμένες μετατοπίσεις (ή και περιστροφές) που αντιστοιχούν στις αναγκαίες (γεωμετρικές) οριακές συνθήκες.

## Είδη φορίσεων

Στα Πεπερασμένα Στοιχεία τα φορτία ασκούνται πάντα στους κόμβους των στοιχείων. Διακρίνονται σε φορτία ασκούμενα σε ένα σημείο (σημειακά), φορτία ασκούμενα κατά μήκος μιας γραμμής, φορτία ασκούμενα σε επιφάνεια (επιφανειακά) και ασκούμενα σε όγκο.

## Είδη στηρίξεων

Οι στηρίξεις περιορίζουν την μετατόπιση και την περιστροφή του σώματος σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Διακρίνονται σε ασκούμενες σε ένα σημείο (point support), ασκούμενες κατά μήκος μιας γραμμής (line support), ασκούμενες σε επιφάνεια (area support) και ασκούμενες επί του όγκου (volume support). Όλες οι στηρίξεις ασκούνται στους κόμβους.

## Μητρώο ακαμψίας

Ως μητρώο ακαμψίας ονομάζεται ο τετραγωνικός πίνακας ο οποίος περιγράφει την στιβαρότητα της κατασκευής που είναι υπό μελέτη. Αν η κατασκευή αποτελείται από ένα στοιχείο (ράβδος) τότε το τοπικό μητρώο ακαμψίας είναι και το συνολικό. Αντίθετα, αν η κατασκευή αποτελείται από παραπάνω από δύο στοιχεία (δικτύωμα), τότε κατασκευάζεται το μητρώο του κάθε στοιχείου ξεχωριστά και στην συνέχεια από τα επιμέρους μητρώα προκύπτει το συνολικό. Θα πρέπει να είναι τετραγωνικό, συμμετρικό, θετικά ορισμένο και η διαγώνιος να αποτελείται από θετικά στοιχεία.

Η διαδικασία κατασκευής του συνολικού μητρώου ακαμψίας έχει ως εξής:

- a) Διαβάζουμε την γεωμετρία, το υλικό, τις οριακές συνθήκες και τις φορτίσεις της κατασκευής.
- b) Αριθμούνται όλα τα στοιχεία της κατασκευής από 1 έως n.
- c) Αριθμούνται όλοι οι βαθμοί ελευθερίας της κατασκευής από 1 έως n.
- d) Δημιουργείται μια αρχική μορφή του μητρώου ακαμψίας, δηλαδή ένας πίνακας  $n \times n$  με μηδενικά στοιχεία.
- e) Υπολογίζονται τα μητρώα ακαμψίας του κάθε στοιχείου ξεχωριστά.
- f) Προστίθενται ανά κόμβο τα μητρώα των στοιχείων και δημιουργείται το συνολικό μητρώο ακαμψίας.

## Ισορροπία δυνάμεων

Στη ΜΠΣ δεν ισχύουν οι συνθήκες ισορροπίας σε κάθε σημείο του συνεχούς μέσου. Υπάρχουν όμως δύο βασικές συνθήκες οι οποίες ικανοποιούνται πάντοτε από τη λύση του προβλήματος, ανεξάρτητα του αριθμού των στοιχείων που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη διακριτοποίηση. Αυτές είναι:

1. Ισορροπία των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε κόμβο.
2. Ισορροπία των κομβικών δυνάμεων για κάθε στοιχείο.

## Είδη Ανάλυσης

Στην ΜΠΣ τα είδη της ανάλυσης της κατασκευής είναι τα εξής:

1. Γραμμική-Στατική Ανάλυση.
2. Γραμμική-Δυναμική Ανάλυση.
3. Μη Γραμμική-Στατική Ανάλυση.
4. Μη Γραμμική-Δυναμική Ανάλυση.

Στην παρούσα διπλωματική θα γίνει γραμμική στατική-δυναμική ανάλυση της φρακτής.

<b>Excitation</b>	<b>Structure</b>	<b>Response</b>	<b>Basic analysis type</b>
Static	Elastic	Linear	Linear-Elastic-Static Analysis
Static	Elastic	Nonlinear	Nonlinear-Elastic-Static Analysis
Static	Inelastic	Linear	Linear-Inelastic-Static Analysis
Static	Inelastic	Nonlinear	Nonlinear-Inelastic-Static Analysis
Dynamic	Elastic	Linear	Linear-Elastic-Dynamic Analysis
Dynamic	Elastic	Nonlinear	Nonlinear-Elastic-Dynamic Analysis
Dynamic	Inelastic	Linear	Linear-Inelastic-Dynamic Analysis
Dynamic	Inelastic	Nonlinear	Nonlinear-Inelastic-Dynamic Analysis

Εικόνα 15. Είδη Ανάλυσης ΜΠΣ.

## Συναρτήσεις σχήματος

Σημαντικό βήμα στην πορεία ανάπτυξης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί η έκφραση του πεδίου των μετακινήσεων ενός στοιχείου ως προς τις ακραίες μετακινήσεις των τμημάτων του προβλήματος. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται συνολικός έλεγχος του πεδίου μετακινήσεων, της συνέχειας του πεδίου και της ικανοποίησης των οριακών συνθηκών. Συνεπώς, συνδέονται οι ακραίες μετακινήσεις των στοιχείων με τις καθολικές μετακινήσεις του φορέα. Η παραπάνω κατάσταση εκφράζεται μέσα από τις συναρτήσεις σχήματος.

## Συνάρτηση μετατόπισης

Συνάρτηση μετατόπισης ονομάζεται η συνάρτηση που περιγράφει την μετατόπιση κάθε σημείου ενός στοιχείου συναρτήσει των μετατοπίσεων των κόμβων του. Οι συναρτήσεις αυτές είναι συνήθως πολυωνυμικές και θα πρέπει να πληρούν τα εξής κριτήρια:

1. Να είναι συνεχής.
2. Να είναι εφικτή η μετατόπιση για κάθε στοιχείο ενός στερεού σώματος.
3. Να μπορεί να προσομοιάσει σταθερή παραμόρφωση σε πολύ μικρά στοιχεία.
4. Να μην δημιουργούνται κενά ή επικαλύψεις μεταξύ του μετατοπισμένου στοιχείου και αυτού στο σύνορό του.

Η συναρτήσεις μετατόπισης έχουν την μορφή:

$$u = \sum_i N_i u_i$$

Όπου,

$N_i$  οι συναρτήσεις σχήματος,

$u_i$  οι κομβικές τιμές.

### Συνάρτηση παρεμβολής

Οι συναρτήσεις παρεμβολής είναι και αυτές πολυωνυμικές συναρτήσεις  $n$  βαθμού. Η μορφή τους εξασφαλίζει την ομαλή μετατόπιση εντός του στοιχείου, όχι όμως απαραίτητα την ομαλότητα της μετατόπισης στο σύνολο, εφόσον μάλιστα δεν ισχύει η συνέχεια της συνάρτησης ή των παραγώγων στα σύνορα μεταξύ των στοιχείων.

### Τάξη πολυωνυμικών συναρτήσεων

Η επιλογή της τάξης των συναρτήσεων εξαρτάται από το είδος των στοιχείων. Για παράδειγμα, σε ένα μονοδιάστατο γραμμικό στοιχείο δύο κόμβων, όπου κάθε κόμβος έχει έναν βαθμό ελευθερίας, η συνάρτηση έχει τη μορφή:

$$u = \alpha_0 + \alpha_1 x$$

Αντίθετα, αν κάθε ένας από τους δύο κόμβους έχει δύο βαθμούς ελευθερίας, τότε η συνάρτηση είναι της μορφής:

$$u = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x^3$$

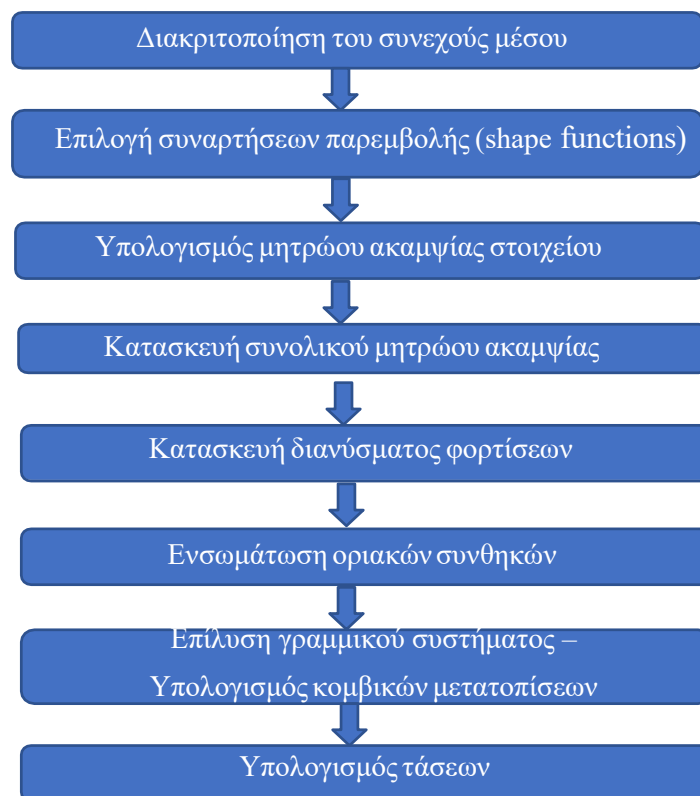
Αν οι συναρτήσεις που αναπαριστούν την γεωμετρία ενός στοιχείου είναι ίδιες με τις συναρτήσεις που εκφράζουν την μεταβολή της μετατόπισης, τότε τα στοιχεία καλούνται ισοπαραμετρικά. Σε περίπτωση που η τάξη των συναρτήσεων γεωμετρίας είναι ανώτερη από την τάξη των συναρτήσεων μετατόπισης, τα στοιχεία λέγονται υπερπαραμετρικά, ενώ αν είναι κατώτερη καλούνται υποπαραμετρικά.



### 3.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΠΣ

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων εφαρμόζεται με βάση την παρακάτω μεθοδολογία.

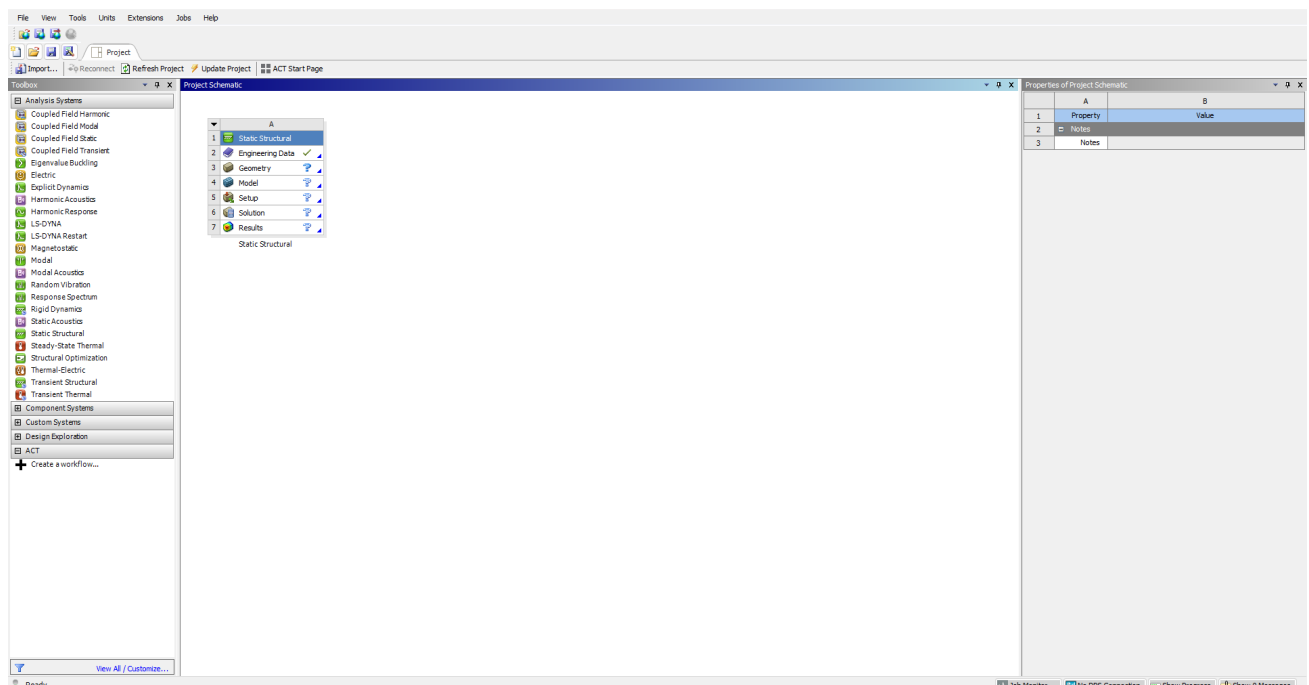
1. Διακριτοποίηση συνεχούς μέσου. Η αρχική γεωμετρία υποδιαιρείται σε πεπερασμένο αριθμό μικρότερων στοιχείων ίδιας ή τυχαίας γεωμετρίας και συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους.
2. Εκλογή συναρτήσεων σχήματος. Ορίζονται οι κατάλληλες συναρτήσεις με τις οποίες εκφράζεται η μετατόπιση οποιουδήποτε εσωτερικού σημείου του στοιχείου συναρτήσει των κομβικών του μετατοπίσεων. Οι συναρτήσεις μπορεί να είναι γραμμικές ή ανώτερης τάξης (πολυωνυμικές). Η γεωμετρία του στοιχείου μπορεί επιπλέον να εκφραστεί συναρτήσει των ίδιων συναρτήσεων σχήματος (ισο-παραμετρικά στοιχεία).
3. Κατασκευή μητρώου ακαμψίας. Κατασκευάζεται το μητρώο ακαμψίας του κάθε στοιχείου με τη χρήση ενεργειακών θεωρημάτων (ΑΔΕ, Castigliano) στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.
4. Κατασκευή συνολικού μητρώου ακαμψίας. Κατασκευάζεται το συνολικό μητρώο ακαμψίας με συνάθροιση ανά κόμβο των επιμέρους μητρώων. Το συνολικό μητρώο ακαμψίας είναι συμμετρικό και με ενισχυμένη διαγώνιο και χρησιμοποιείται γενικό σύστημα συντεταγμένων.
5. Κατασκευή διανύσματος φορτίσεων. Τα ασκούμενα φορτία σε κάθε στοιχείο ανάγονται σε κομβικές φορτίσεις και τοποθετούνται με κατάλληλη σειρά στο διάνυσμα των φορτίσεων.
6. Υλοποίηση οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες ικανοποιούνται μέσω της κατασκευής του συνολικού μητρώου ακαμψίας. Για να υλοποιηθεί η ενσωμάτωση των οριακών συνθηκών στο συνολικό μητρώο ακαμψίας μπορεί να γίνει ελάττωση των διαστάσεων του πίνακα. Χωρίς τις οριακές συνθήκες το μητρώο είναι ιδιόμορφο (singular) και δεν μπορεί να αντιστραφεί.
7. Επίλυση γραμμικού συστήματος εξισώσεων. Προσδιορίζονται οι μετατοπίσεις των κόμβων.
8. Υπολογισμός τάσεων, παραμορφώσεων. Υπολογίζονται οι συνιστώσες των τάσεων και των παραμορφώσεων σε διάφορες κατευθύνσεις.



Εικόνα 16. Μεθοδολογία επίλυσης.

### 3.5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

Το ANSYS είναι ένα προηγμένο λογισμικό προσομοίωσης, το οποίο χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς της μηχανικής και γενικότερα της επιστήμης των υλικών, με σκοπό τη διεξαγωγή αναλύσεων και προσομοιώσεων. Η βασικότερη λειτουργία του λογισμικού είναι η δημιουργία προϊόντων ή συστημάτων σε προσομοιώσεις, ώστε να γίνει η απαραίτητη αξιολόγηση της συμπεριφοράς τους, προτού κατασκευαστούν στην πραγματικότητα. Ακόμη, έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση των διάφορων μοντέλων ή προσομοιώσεων μέσω του σχεδιασμού και της ανάλυσης. Επιπροσθέτως, το ANSYS είναι ένα εύχρηστο ηλεκτρονικό εργαλείο καθώς υποστηρίζει κλάδους της Μηχανικής (Στατικής και Δυναμικής), της Στερεομηχανικής, της Θερμοδυναμικής, της Μηχανικής των Ρευστών και του Ηλεκτρομαγνητισμού. Όμως για τη ναυπηγική, οι πιο σημαντικές χρήσεις του λογισμικού αφορούν τους κλάδους της Μηχανικής (Στατικής και Δυναμικής), της Στερεομηχανικής, της Θερμοδυναμικής και της Μηχανικής των Ρευστών. Σημαντικό να αναφερθεί είναι πως δύναται να αναλύει σύνθετα ή πολυμερή υλικά αλλά και να βελτιστοποιεί τους σχεδιασμούς μέσω βέλτιστων παραμέτρων σχεδιασμού, οι οποίες παράμετροι πληρούν τα κριτήρια απόδοσης. Τέλος, το ολοκληρωμένο εργαλείο προσομοίωσης ANSYS δίνει τη δυνατότητα να μελετηθούν οι προσομοιώσεις σε πλαίσια που θυμίζουν σενάρια του πραγματικού κόσμου, όπως είναι η συμπεριφορά των οχημάτων σε συγκρούσεις ή η ροή ρευστού γύρω από κατασκευές. Αποτέλεσμα της ικανότητας αυτής, είναι η βελτιστοποίηση των σχεδίων, της απόδοσης, της αξιοπιστίας και της ασφάλειας των παραγόμενων προϊόντων ή συστημάτων. Στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιηθεί η επιλογή Static Structural.



Εικόνα 17. ANSYS interface.

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

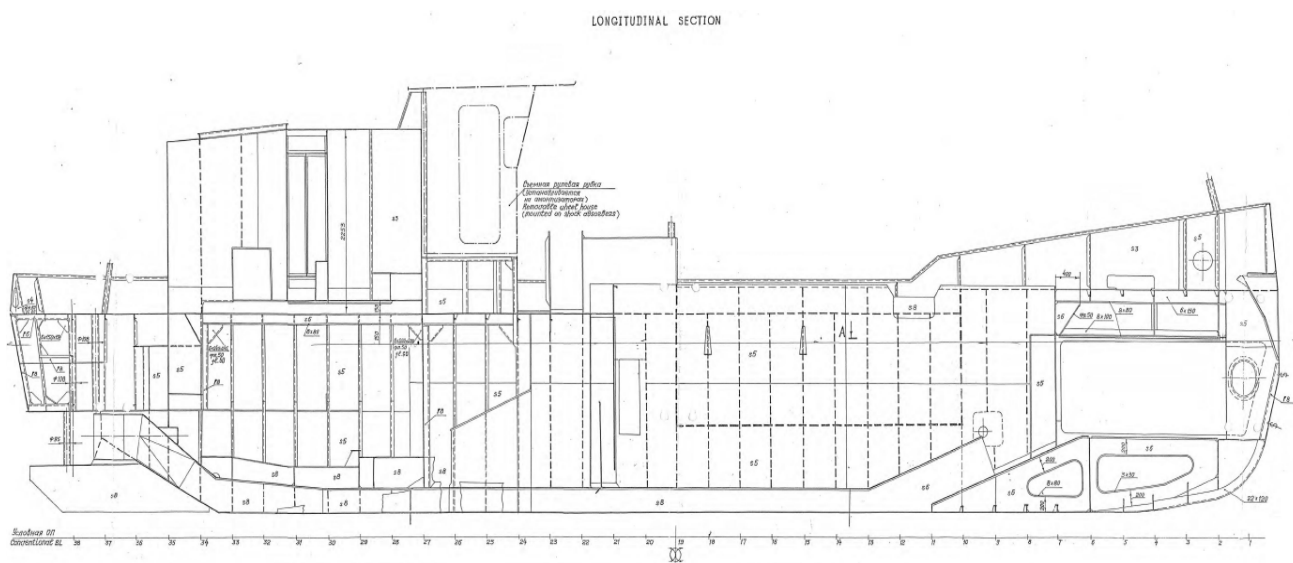
### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΛΟΙΟΥ

Το πλοίο το οποίο εξετάζεται στην διπλωματική εργασία είχε χαρακτηριστεί αρχικά ως περιβαλλοντικό και εκτελούσε καθήκοντα καθαρισμού της επιφάνειας της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές της Αττικής. Η λειτουργία του ήταν η αναρρόφηση του θαλασσινού νερού από τα προωαία πλαϊνά στόμια και ο μετέπειτα καθαρισμός από πλαστικά και άλλα απορρίμματα με ειδικό μηχανισμό που έφερε στο κύτος του. Συνεπώς, δεν διέθετε προωαία υδατοστεγής φρακτή συγκρούσεως. Οι κύριες διαστάσεις είναι οι εξής:

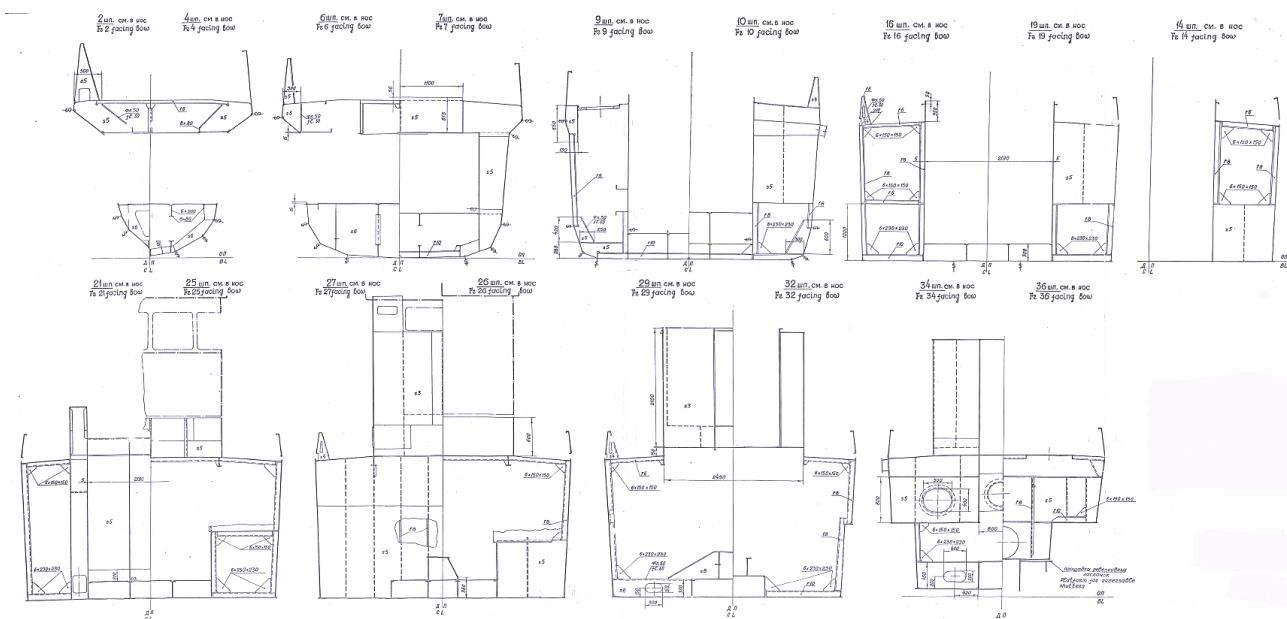
L.O.A. (ext)	18.95	m
L.W.L (ext)	18.76	m
L.W.L (mld)	18.74	m
L.B.P.	18	m
B (ext)	4.51	m
B (mld)	4.5	m
BWL (mld)	4.44	m
D (mld)	2.4	m
T (mld)	1.7	m
Lfr(0-1)=	0.425	m
Lfr(1-38)=	0.475	m

Το ext δηλώνει απόσταση που συμπεριλαμβάνει το πάχος του ελάσματος, ενώ το mld (moulded) όχι.

Τα απαραίτητα σχέδια που πρέπει να παρουσιαστούν με την αρχική μορφή του σκάφους είναι το κατασκευαστικό σχέδιο της διαμήκους τομής στην Center Line του πλοίου και το σχέδιο εγκαρσίων τομών σε κάθε νομέα.

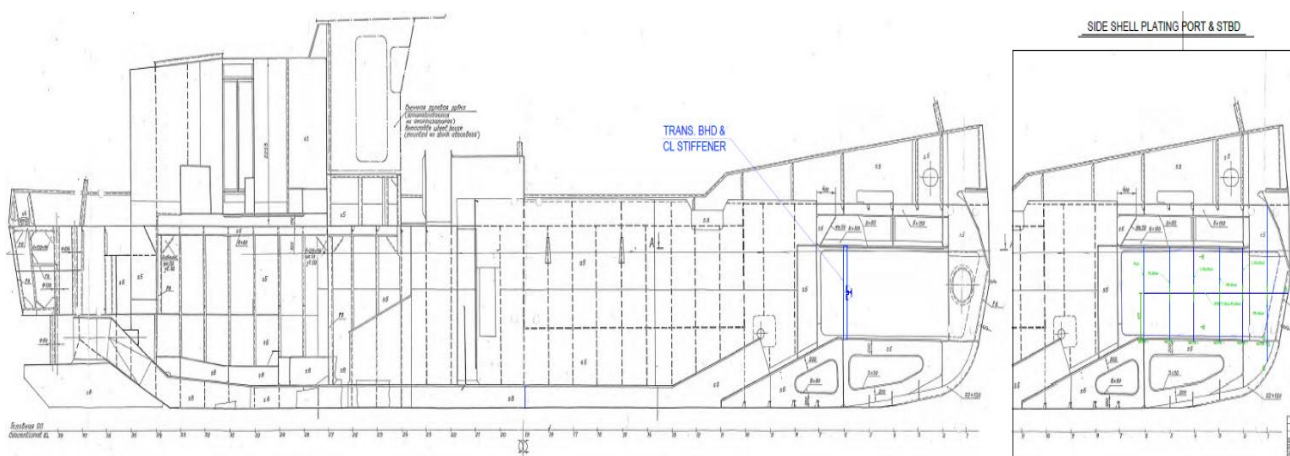


Εικόνα 18. Κατασκευαστικό σχέδιο διαμήκους τομής (longitudinal section).



Εικόνα 19. Σχέδιο εγκάρσιων τομών (transverse sections).

Για τις ανάγκες της μετασκευής και χαρακτηρισμού του πλοίου ως φορτηγό, τα πλαϊνά στόμια αφαιρέθηκαν, η γάστρα στεγανοποιήθηκε με την προσθήκη πλαϊνών ελασμάτων και ενισχυτικών και προστέθηκε πρωραία στεγανή φρακτή συγκρούσεως (forepeak collision bulkhead), δημιουργώντας μία νέα πρωραία δεξαμενή (fore peak tank). Η δεξαμενή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δεξαμενή έρματος (ballast tank) ή κενός χώρος (void space). Στην συνέχεια, παρατίθενται σχέδια του πλοίου που παρουσιάζουν την μορφή του μετά την μετασκευή.



Εικόνα 20. Κατασκευαστικό σχέδιο διαμήκουσ τομής (longitudinal section).

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η εγκάρσια φρακτή που έχει τοποθετηθεί καθώς και τα πλαϊνά ελάσματα με τα ενισχυτικά τους. Στην συνέχεια της διπλωματικής εργασίας επεξηγείται η επιλογή της θέσης και η διαστασιολόγηση της φρακτής, σύμφωνα με τους κανονισμούς του Αμερικανικού Νηογώμονα ABS.

## 4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΦΡΑΚΤΗΣ

Η πρωραία υδατοστεγής φρακτή συγκρούσεως του πλοίου είναι το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σχέδια της φρακτής καθώς και οι διαστάσεις και τα ενισχυτικά που επιλέχθηκαν ώστε να είναι κατάλληλα σύμφωνα με τους κανονισμούς του ABS. Στην συνέχεια, θα αναλυθεί η πορεία που ακολουθήθηκε στην κατασκευή της φρακτής. Θα πρέπει να αναφερθεί πως η εκλογή διαστάσεων και ενισχυτικών είναι μία πρώτη εκτίμηση και πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις των κανονισμών. Δεν σημαίνει απαραίτητα πως αντέχουν τα φορτία που θα ορίσουμε στην κατασκευή. Συνεπώς, θα ξεκινήσουμε με τα ελάχιστα επιτρεπτά όρια και θα γίνει, αν χρειαστεί, η απαραίτητη βελτιστοποίηση.

### 4.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

#### Γενικά

Από κανονισμό 3-2-9/1.1 (σελ. 21) είναι υποχρεωτική η κατασκευή στεγανών φρακτών και η αποτύπωσή τους στα σχέδια. Από κανονισμό 3-2-9/3.1.1 (σελ.22) είναι υποχρεωτική η κατασκευή πρωραίας φρακτής συγκρούσεως και θα εκτείνεται μέχρι το κατάστρωμα εξάλλων.

#### Ανοίγματα

Από κανονισμούς 3-2-9/1.3 (σελ. 21) και 3-2-9/3.1.1 (σελ.22) η πρωραία φρακτή συγκρούσεως δεν θα έχει κανένα είδους άνοιγμα, διότι υπάρχουν ήδη ανοίγματα στα καταστρώματα για τις όποιες απαραίτητες ενέργειες.

#### Βαλβίδες

Από κανονισμό 3-2-9/1.5 (σελ. 21) η φρακτή δεν θα διαθέτει κανένα είδους μηχανολογικό εξάρτημα (βάνα, φλάντζα).

#### Στεγανότητα

Από κανονισμό 3-2-9/1.13.1 (σελ. 22) η φρακτή θα αποτελείται από συνεχόμενο έλασμα και συγκολλημένα ενισχυτικά χωρίς κανένα άνοιγμα.

#### Διάταξη

Από κανονισμό 3-2-9/3.1.2 (σελ. 22) η πρωραία φρακτή συγκρούσεως θα είναι τοποθετημένη σε απόσταση μεγαλύτερη από  $0.05L_r$  πρύμνηθεν του σημείου αναφοράς.

Όπου,

$$L_r = L_f$$

Από κανονισμό 3-1-1/3.3 (σελ.19)

$L_f = L_{BP(0.85D)}$  ή  $0.96L_{WL(0.85D)}$  ,όποιο είναι μεγαλύτερο.

$$L_{BP(0.85D)} = 18 \text{ m} \quad \text{και} \quad 0.96L_{WL(0.85D)} = 18.1 \text{ m}$$

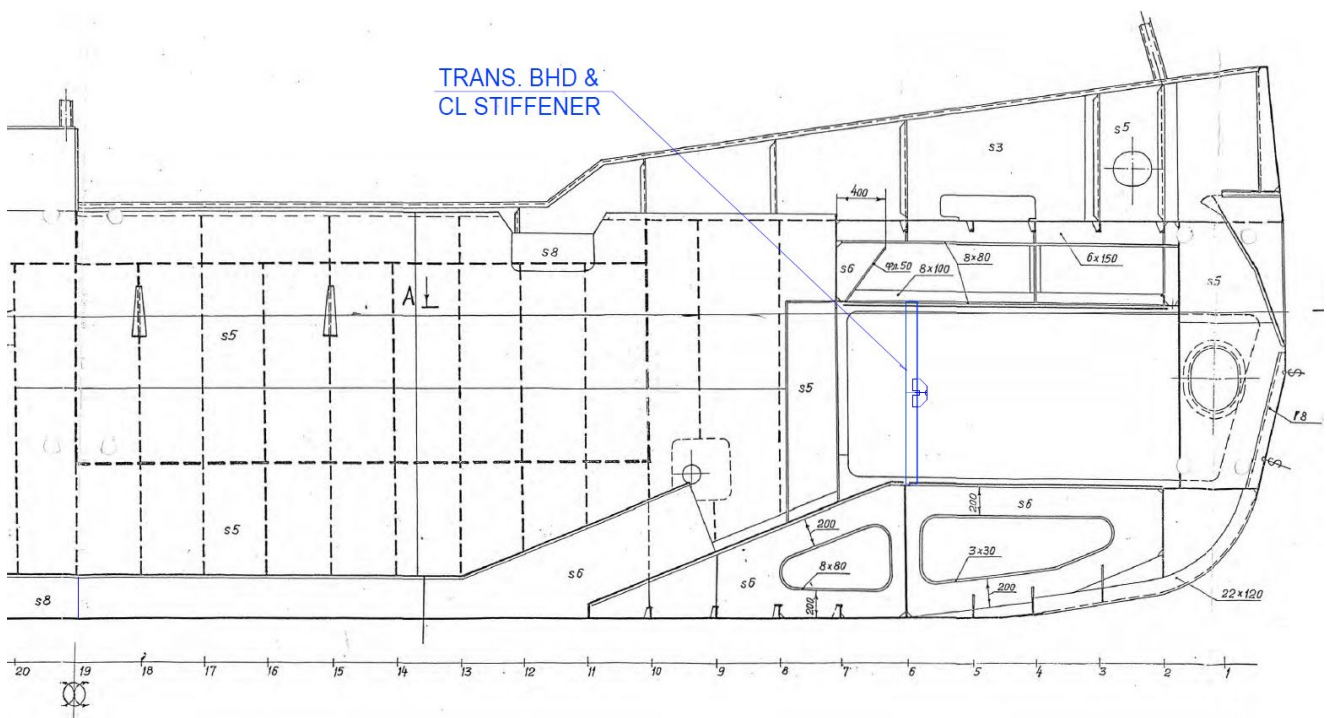
Άρα,

$$L_r = L_f = 18.1 \text{ m}$$

Άρα, η πρωραία φρακτή συγκρούσεως θα είναι τοποθετημένη σε απόσταση μεγαλύτερη από  $0.05 * 18.1 = 0.935 \text{ m}$  πρύμνηθεν από το σημείο αναφοράς. Το πλοίο δεν διαθέτει βολβοειδής πλώρη, άρα το σημείο αναφοράς είναι το πρωραίο σημείο του  $L_r$  .

Συνεπώς, μπορούμε να τοποθετήσουμε την πρωραία φρακτή συγκρούσεως σε οποιοδήποτε σημείο του σκάφους και σε απόσταση μεγαλύτερη από  $0.935 \text{ m}$  πρύμνηθεν του ακροπρωραίου σημείου στο 85% του κοίλου.

Ο νομέας 6, σύμφωνα με τις ισαποστάσεις των νομέων που δίνονται στο σχέδιο, βρίσκεται  $2.8 \text{ m}$  πρύμνηθεν του σημείου αναφοράς ( $0.425+5*0.475$ ), άρα είναι αποδεκτό σημείο για την τοποθέτηση της φρακτής. Επίσης, επιλέγεται ο νομέας 6 διότι κάτω από την φρακτή υπάρχει ήδη ένα εγκάρσιο ενισχυτικό (web), όπου μπορεί να πατήσει και να ευθυγραμμιστεί η φρακτή με αυτό, διασφαλίζοντας την ομαλή μεταφορά φορτίσεων μεταξύ των ενισχυτικών.



Εικόνα 21. Κατασκευαστικό σχέδιο που απεικονίζει την θέση της πρωραίας φρακτής συγκρούσεως κατά το διάμηκες.



#### 4.2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΝΙΣΧΥΣΕΩΝ

Για την ενίσχυση της φρακτής επιλέγεται να τοποθετηθούν τα εξής ενισχυτικά.

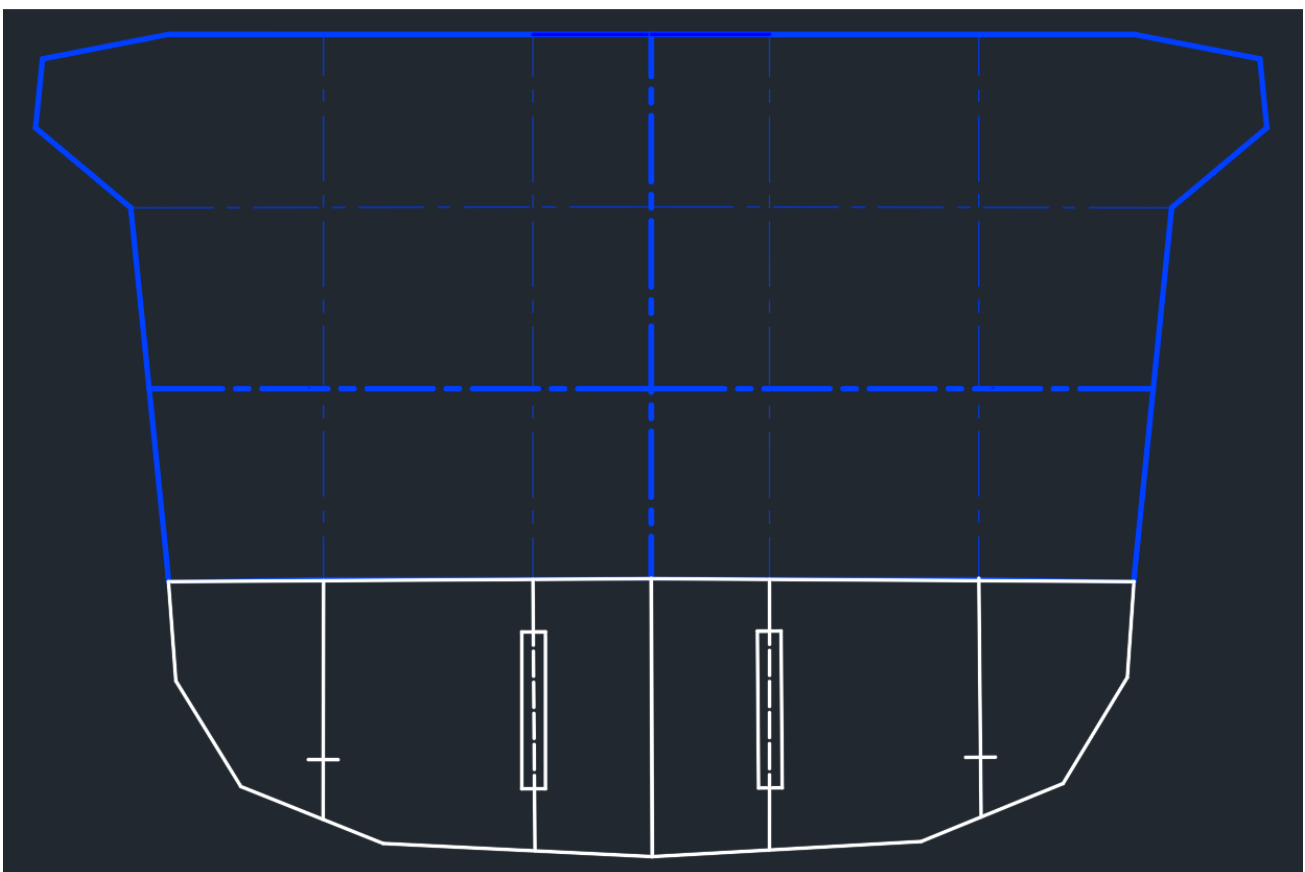
A) Οριζόντια ενισχυτικά : Ένα πρωτεύων και ένα δευτερεύων.

Η επιλογή έγινε με βάση τον αριθμό και τις αποστάσεις των υπαρχόντων πλευρικών διαμήκων ενισχυτικών του πλοίου.

B) Κατακόρυφα ενισχυτικά : Ένα πρωτεύων στην Center Line και τέσσερα δευτερεύοντα.

Η παραπάνω επιλογή προέκυψε από το γεγονός πως κάτω από το κατάστρωμα στο οποίο βρίσκεται η φρακτή υπάρχουν διαμήκη ενισχυτικά του πλοίου (λευκό). Συνεπώς, δίνεται η δυνατότητα τα κάθετα ενισχυτικά της φρακτής να ευθυγραμμιστούν με τα ήδη υπάρχοντα, με σκοπό την ομαλή μεταφορά των κάθετων φορτίων μεταξύ των ενισχυτικών.

Η νέα τομή στον νομέα 6 θα είναι διαμορφωμένη σύμφωνα με το παρακάτω σχέδιο.



Εικόνα 22. Κατασκευαστικό σχέδιο πλωραίας φρακτής συγκρούσεως  
(μπλέ χρώμα - κοιτάζοντας προς την πλώρη).

## 4.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΧΟΥΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

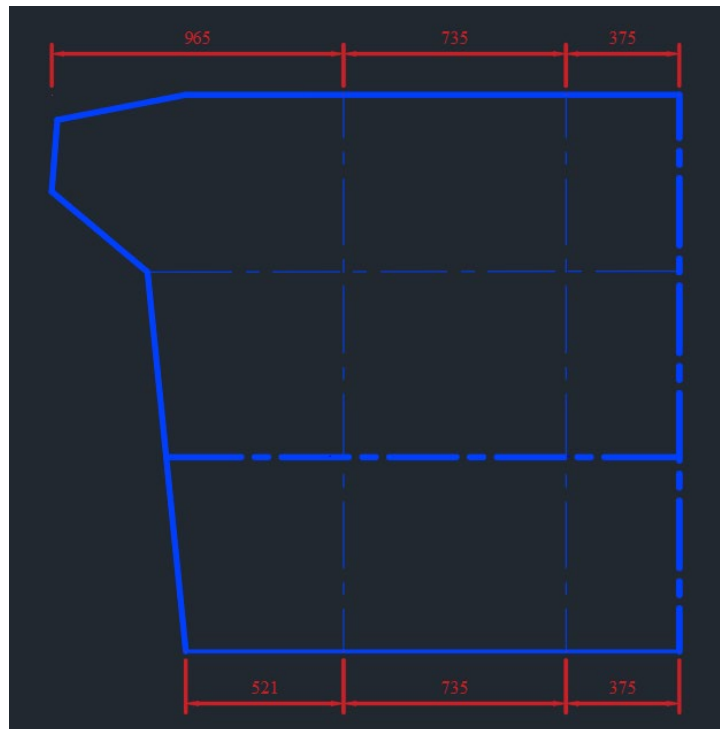
### ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

Από κανονισμό 3-2-9/5.1 (σελ. 23) το ελάχιστο πάχος  $t$  του ελάσματος της φρακτής δίνεται από τον τύπο:

$$t = \frac{sk\sqrt{qh}}{c} + 1.5 \text{ mm}$$

Για το  $s$

$$s = \frac{375 + 735 + 743}{3} = 618 \text{ mm}$$



Εικόνα 23. Σχέδιο εγκάρσιας τομής στον νομέα 6.

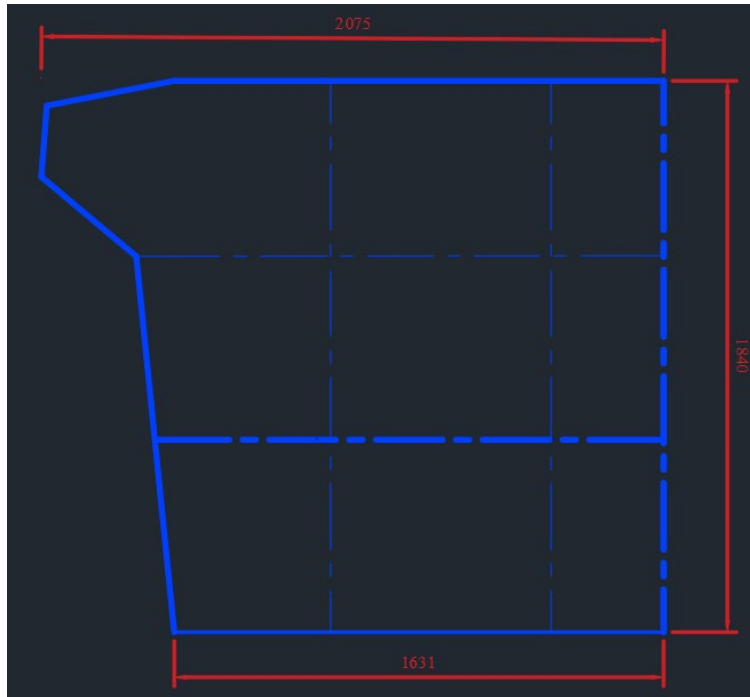
Για το  $k$

$$k = \frac{3.075\sqrt{\alpha} - 2.077}{\alpha + 0.272} = \frac{1.0088}{1.279} = 0.789$$

Όπου,

$$\alpha = \frac{2075 + 1631}{1840} = 1.007$$





Εικόνα 24. Διαστάσεις πλευρών πρωραίας φρακτής συγκρούσεως.

Για το  $q$

$$q = \frac{235}{\gamma} \text{ N/mm}^2$$

Όπου,

$\gamma = 235 \text{ N/mm}^2$  για κοινό ναυπηγικό χάλυβα (υλικό της φρακτής).

Άρα,

$$q = 1.0 \text{ N/mm}^2$$

Για το  $h$

Σύμφωνα με τους κανονισμούς 3-1-1/15.1 (σελ. 20) και 3-1-1/15.3 (σελ.20) το κατάστρωμα φρακτής ορίζεται ως το κατάστρωμα στο οποίο καταλήγει η φρακτή και ως κατάστρωμα εξάλλων το ανώτερο κατάστρωμα το οποίο είναι εκτεθειμένο σε καιρικές συνθήκες. Αν παρατηρήσουμε τις εγκάρσιες τομές σε δύο διαφορετικούς νομείς, παρατηρείται πως το ανώτερο εκτεθειμένο κατάστρωμα συμπίπτει με το κατάστρωμα της φρακτής. Συνεπώς το  $h$  λαμβάνεται από το κατώτερο σημείο του ελάσματος μέχρι το κατάστρωμα.

Άρα,

$$h = 1.840 \text{ m}$$

Για το c

Επειδή η φρακτική συγκρούσεως βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα εξάλων, θα έχω:

$$c = 254$$

Άρα

$$t = \frac{sk\sqrt{qh}}{c} + 1.5 \text{ mm}$$
$$t = \frac{618 \cdot 0.789 \cdot \sqrt{1 \cdot 1.840}}{254} + 1.5 \text{ mm}$$
$$t = 4.1 \text{ mm}$$

Όμως, ο παραπάνω αριθμός απορρίπτεται διότι σύμφωνα με τον κανονισμό, το ελάχιστο πάχος της προσωαίας φρακτικής συγκρούσεως δεν μπορεί να είναι μικρότερο από 6 mm ή  $s/200 + 2.5 \text{ mm}$ , όποιο είναι μεγαλύτερο.

Άρα έχω ως ελάχιστο πάχος ελάσματος:

$$6.0 \text{ mm}$$

ή

$$\frac{s}{200} + 2.5 = \frac{618}{200} + 2.5 = 5.59 \text{ mm}$$

Συνεπώς,

$$t_{\text{BHD}_{\min}} = 6.0 \text{ mm}$$

### ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΠΑΧΟΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

Στα πλαίσια της πραγματικής μελέτης της μετασκευής, επιλέχθηκε να αποφευχθεί η κατασκευή της προσωαίας φρακτικής συγκρούσεως με πάχος ελάσματος 6 mm, διότι είναι το κατώτατο όριο που δίνουν οι κανονισμοί. Για λόγους ασφαλείας, η αύξηση του πάχους ελάσματος της φρακτικής στα 7 mm είναι μία λογική λύση, όχι υπέρ-κοστολογημένη και αποδεκτή από τους κανονισμούς.

Άρα,

$$t_{\text{BHD}} = 7.0 \text{ mm}$$

## 4.2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΑΠΛΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ

### ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Από κανονισμό 3-2-9/5.3 (σελ. 24) η ελάχιστη ροπή αντίστασης των κατακόρυφων δευτερευόντων ενισχυτικών της φρακτής δίνεται από τον τύπο:

$$SM = 7.8kchsl^2$$

Για το k

$$k = 1.25$$

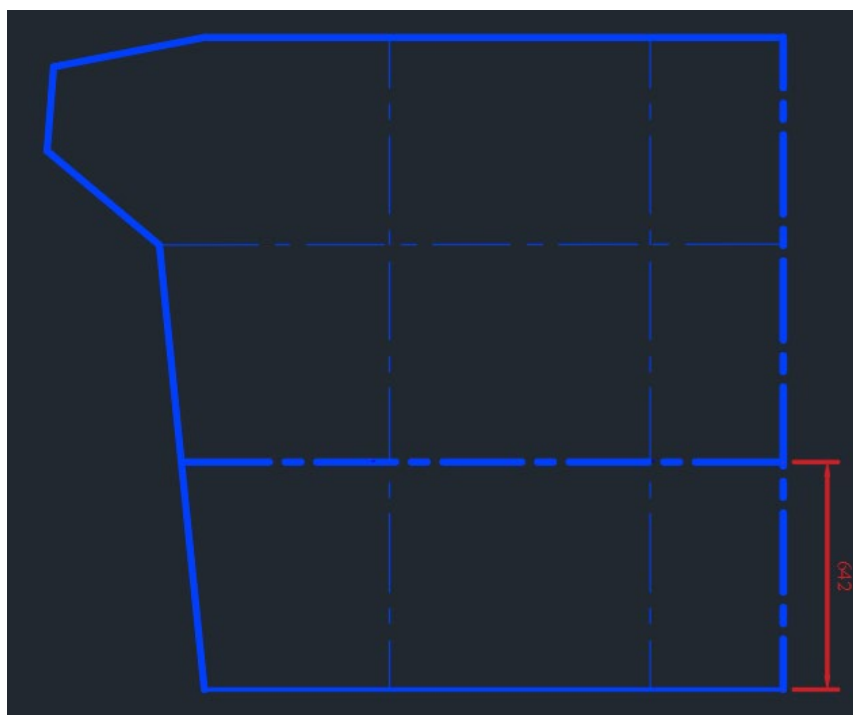
Για το c

Τα απλά ενισχυτικά της φρακτής δεν διαθέτουν υποστήριξη στα άκρα και επειδή το πλοίο είναι κάτω των 46 μέτρων σε μήκος θα έχω:

$$c = 0.58$$

Για το l

$$l = 0.642 \text{ m}$$



Εικόνα 25. Ανυποστήρικτο μήκος δευτερευόντων ενισχυτικών.

### Για το s

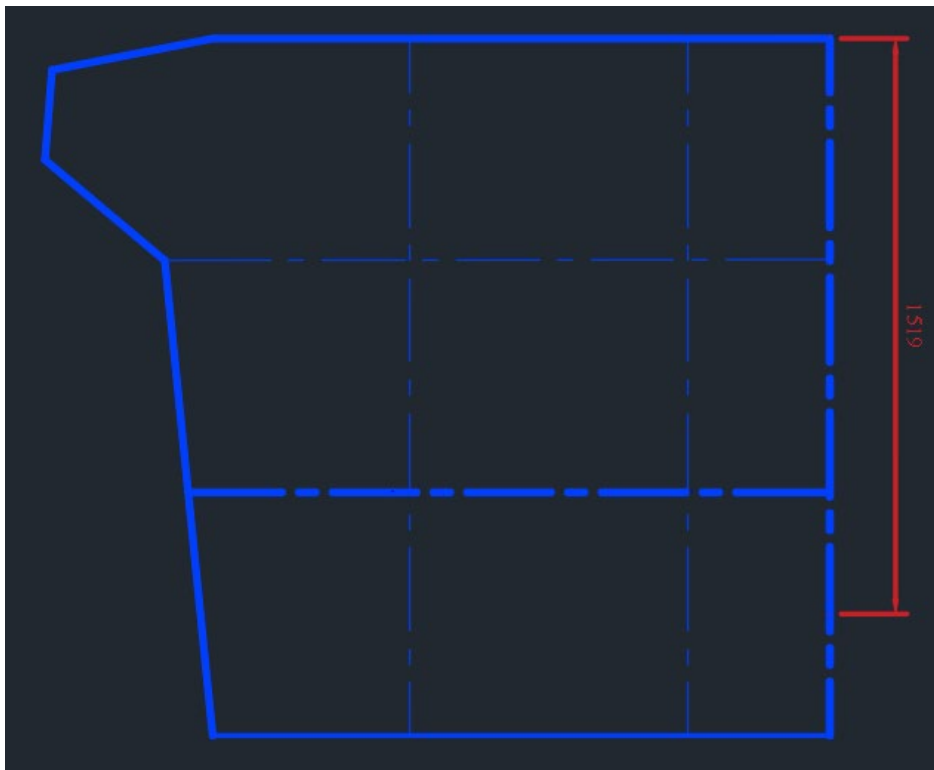
Η ισαπόσταση των απλών ενισχυτικών παραμένει ίδια.

$$s = 0.618 \text{ m}$$

### Για το h

Επειδή το πλοίο είναι κάτω των 46 μέτρων σε μήκος, η απόσταση h υπολογίζεται ως η απόσταση από το μέσον του l μέχρι το κατάστρωμα της φρακτής στην CL.

$$h = 1.519 \text{ m}$$



Εικόνα 26. Απόσταση h.

Επειδή  $1.519 \text{ m} < 6.1 \text{ m}$  θα έχω:

$$h_{\text{new}} = 0.8h + 1.22 = 2.435 \text{ m}$$

Άρα

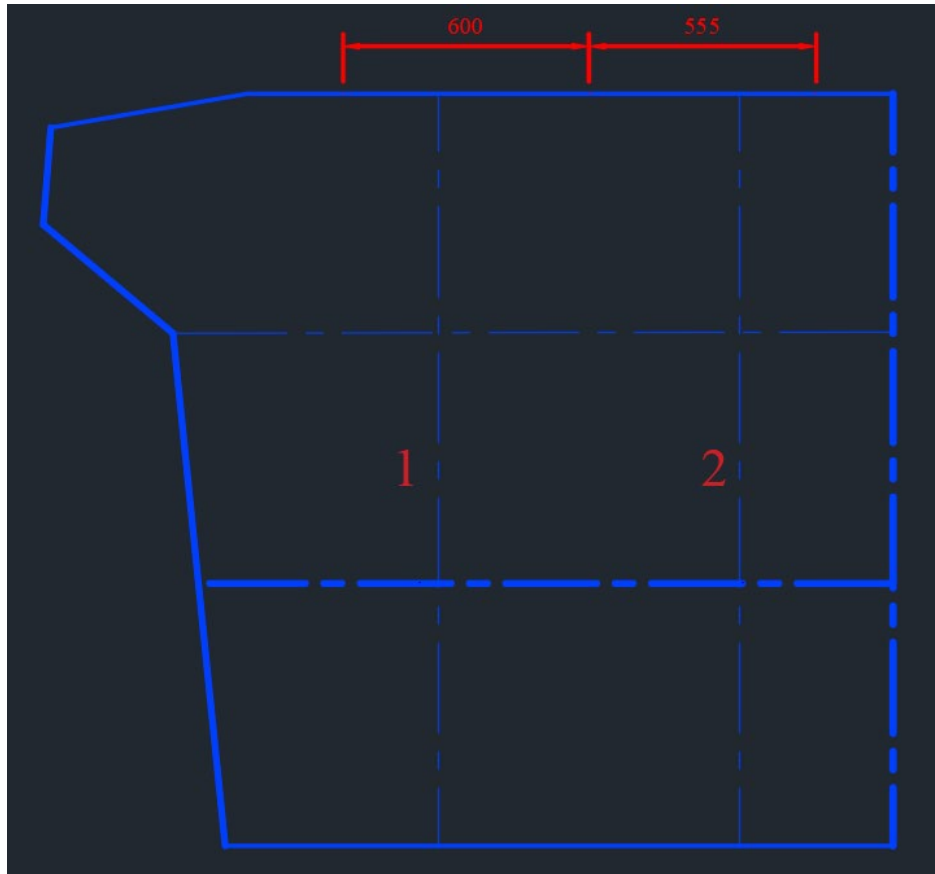
$$SM = 7.8kchsl^2$$

$$SM = 7.8 * 1.25 * 0.58 * 2.435 * 0.618 * 0.642^2$$

$$SM_{\text{min}} = 3.507 \text{ cm}^3$$

## ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Για την εκλογή των δευτερευόντων ενισχυτικών θα πρέπει να υπολογίσουμε την πραγματική ροπή αντίστασης και να την συγκρίνουμε με την ελάχιστη που δίνεται από τους κανονισμούς, όπως υπολογίσθηκε παραπάνω. Επιλέγουμε ως δευτερεύον ενισχυτικό απλή λάμα (flat-bar) με πλάτος 60 mm, πάχος 6 mm και πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 27. Αποστάσεις συνεργαζόμενου ελάσματος.

Για το ενισχυτικό νο.1

a/a	dim (cm)	dim. (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	d (cm)	Axd (cm <sup>3</sup> )	Axd <sup>2</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>0</sub> (cm <sup>4</sup> )
1	60	0.7	42	0.35	14.7	5.145	1.715
2	6	0.6	3.6	3.7	13.32	49.284	10.8
SUM			45.6		28.02	54.429	12.515

$$y_1 = \frac{\Sigma(A * d)}{\Sigma(A)} = 0.614 \text{ cm}$$

$$y_2 = 6.7 - y_1 = 6.086 \text{ cm}$$

$$I_{XX} = \Sigma(A * d)^2 + \Sigma(I_O) = 66.944 \text{ cm}^4$$

$$I_{YY} = I_{XX} - A * (y_1)^2 = 49.726 \text{ cm}^4$$

$$SM_{1A} = \frac{I_{YY}}{y_1} = 80.925 \text{ cm}^3$$

$$SM_{1B} = \frac{I_{YY}}{y_2} = 8.171 \text{ cm}^3$$

$$SM_{\min} = 3.507 \text{ cm}^3 < SM_{1B} = 8.171 \text{ cm}^3$$

Εγκρίνεται.

Για το ενισχυτικό νο.2

a/a	dim (cm)	dim. (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	d (cm)	Axd (cm <sup>3</sup> )	Axd <sup>2</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>O</sub> (cm <sup>4</sup> )
1	55.5	0.7	38.85	0.35	13.598	4.759	1.586
2	6	0.6	3.6	3.7	13.32	49.284	10.8
SUM			42.45		26.918	54.043	12.386

$$y_1 = \frac{\Sigma(A * d)}{\Sigma(A)} = 0.634 \text{ cm}$$

$$y_2 = 6.7 - y_1 = 6.066 \text{ cm}$$

$$I_{XX} = \Sigma(A * d)^2 + \Sigma(I_O) = 66.43 \text{ cm}^4$$

$$I_{YY} = I_{XX} - A * (y_1)^2 = 49.361 \text{ cm}^4$$

$$SM_{2A} = \frac{I_{YY}}{y_1} = 77.845 \text{ cm}^3$$

$$SM_{2B} = \frac{I_{YY}}{y_2} = 8.137 \text{ cm}^3$$

$$SM_{\min} = 3.507 \text{ cm}^3 < SM_{2B} = 8.137 \text{ cm}^3$$

Εγκρίνεται.

## 4.2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥ

### ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Από κανονισμό 3-2-9/5.7 (σελ. 25) η ελάχιστη ροπή αντίστασης του κατακόρυφου πρωτεύοντος ενισχυτικού της φρακτής δίνεται από τον τύπο:

$$SM = 4.74kchs^2$$

### Για το $k$

Επειδή το ενισχυτικό ανήκει στην πρωραία φρακτή συγκρούσεως θα έχω:

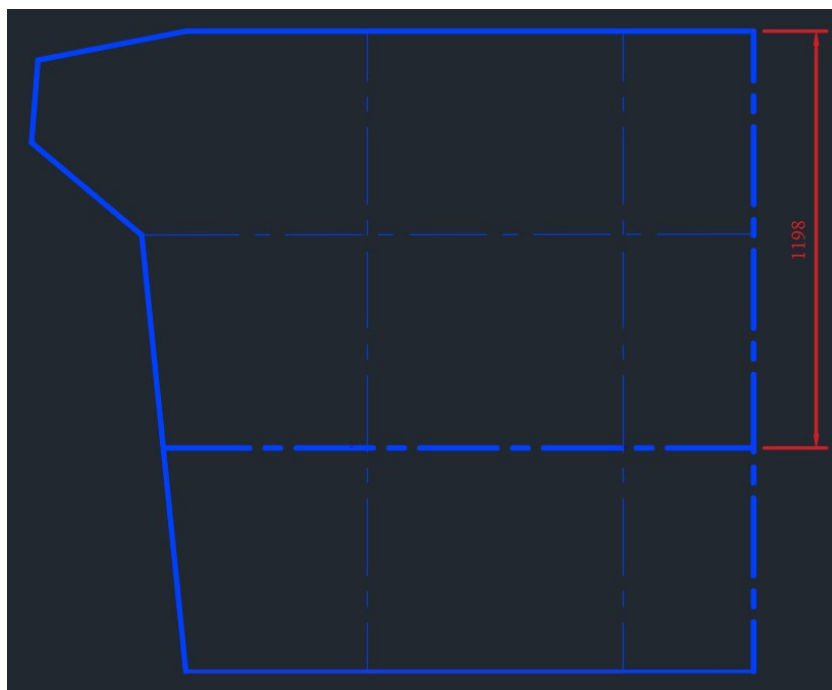
$$k = 1.25$$

### Για το $c$

$$c = 1.00$$

### Για το $l$

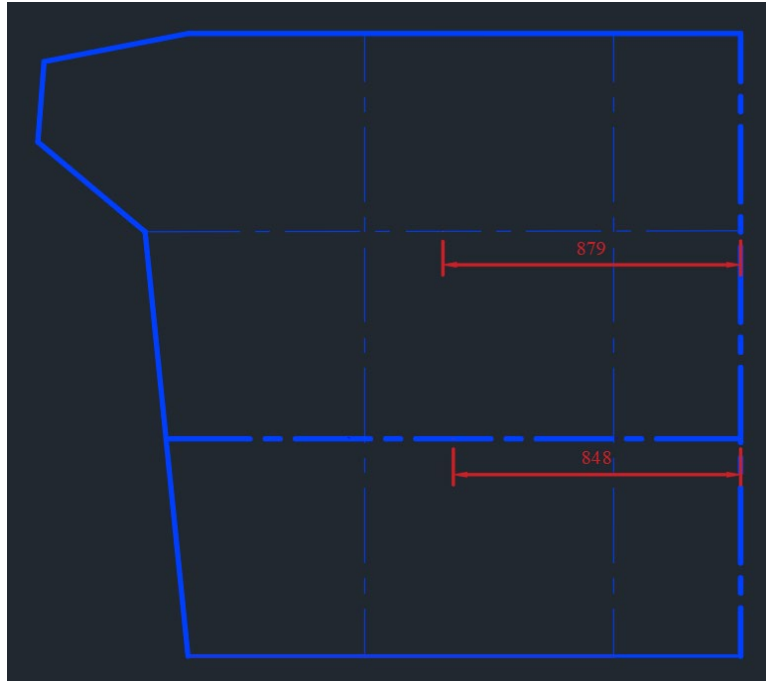
$$l = 1.198 \text{ m}$$



Εικόνα 28. Ανυποστήρικτο μήκος κατακόρυφου κύριου ενισχυτικού.

### Για το $s$

$$s = 0.879 + 0.848 = 1.727 \text{ m}$$



Εικόνα 29. Απόσταση s.

### Για το h

Η απόσταση, από το μισό του l,  $h = 0.599$  m είναι μικρότερη από 6.1 m. Συνεπώς:

$$h_{\text{new}} = 0.8h + 1.22 = 1.699 \text{ m}$$

### Άρα

$$SM = 4.74kchsl^2$$

$$SM = 4.74 * 1.25 * 1.699 * 1.727 * 1.198^2$$

$$SM_{\text{min}} = 24.951 \text{ cm}^3$$

### ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Για την εκλογή του πρωτεύοντος ενισχυτικού θα πρέπει να υπολογίσουμε την πραγματική ροπή αντίστασης και να την συγκρίνουμε με την ελάχιστη που βρέθηκε από τους κανονισμούς, όπως υπολογίσθηκε παραπάνω. Επιλέγουμε ως πρωτεόν ενισχυτικό τύπου T (T 80X6 FB150X6) και πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα.





Εικόνα 30. Ημιπλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος κύριου κατακόρυφου ενισχυτικού.

Άρα,

a/a	dim (cm)	dim. (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	d (cm)	Axd (cm <sup>3</sup> )	Axd <sup>2</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>o</sub> (cm <sup>4</sup> )
1	37.5	0.7	26.25	0.35	9.188	3.216	1.072
2	8	0.6	4.8	4.7	22.56	106.032	25.6
3	15	0.6	9	9	81	729	0.27
SUM			40.05		112.748	838.248	26.942

$$y_1 = \frac{\Sigma(A * d)}{\Sigma(A)} = 2.815 \text{ cm}$$

$$y_2 = 9.3 - y_1 = 6.485 \text{ cm}$$

$$I_{XX} = \Sigma(A * d)^2 + \Sigma(I_o) = 865.19 \text{ cm}^4$$

$$I_{YY} = I_{XX} - A * (y_1)^2 = 547.786 \text{ cm}^4$$

$$SM_{3A} = \frac{I_{YY}}{y_1} = 194.584 \text{ cm}^3$$

$$SM_{3B} = \frac{I_{YY}}{y_2} = 84.472 \text{ cm}^3$$

$$SM_{\min} = 24.951 \text{ cm}^3 < SM_{3B} = 84.472 \text{ cm}^3$$

Εγκρίνεται.

## 4.2.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΠΛΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥ

### ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Από κανονισμό 3-2-9/5.3 (σελ. 24) η ελάχιστη ροπή αντίστασης του οριζόντιου δευτερεύοντος ενισχυτικού της φρακτής δίνεται από τον τύπο:

$$SM = 7.8kchsl^2$$

Για το k

$$k = 1.25$$

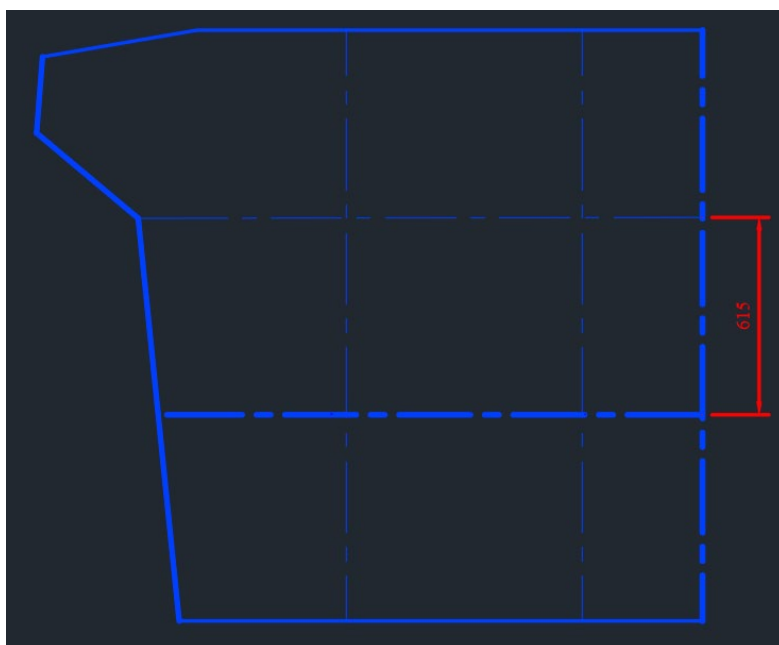
Για το c

$$c = 0.58$$

Για το s

Επειδή υπάρχει μόνο ένα δευτερεύον οριζόντιο ενισχυτικό, η ισαπόσταση υπολογίζεται ως η μεγαλύτερη απόσταση μέχρι το επόμενο ενισχυτικό (πρωτεύον).

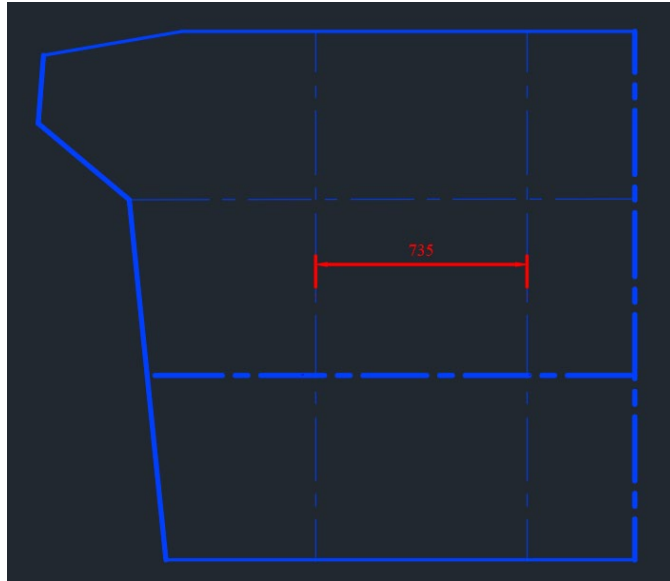
$$s = 0.615 \text{ m}$$



Εικόνα 31. Ισαπόσταση οριζόντιου δευτερεύοντος ενισχυτικού.

Για το l

$$l = 0.735 \text{ m}$$

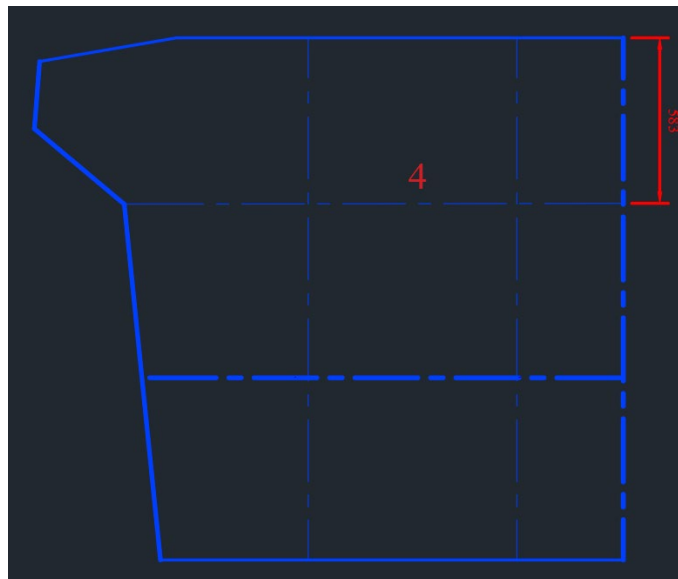


Εικόνα 32. Ανυποστήρικτο μήκος οριζόντιου δευτερεύοντος ενισχυτικού.

Για το  $h$

Επειδή η απόσταση  $h = 0.583$  m είναι μικρότερη από 6.1 m, θα είναι:

$$h_{\text{new}} = 0.8h + 1.22 = 1.686 \text{ m}$$



Εικόνα 33. Απόσταση από το μέσον του  $l$  μέχρι το κατάστρωμα στεγανών φρακτών.

Άρα,

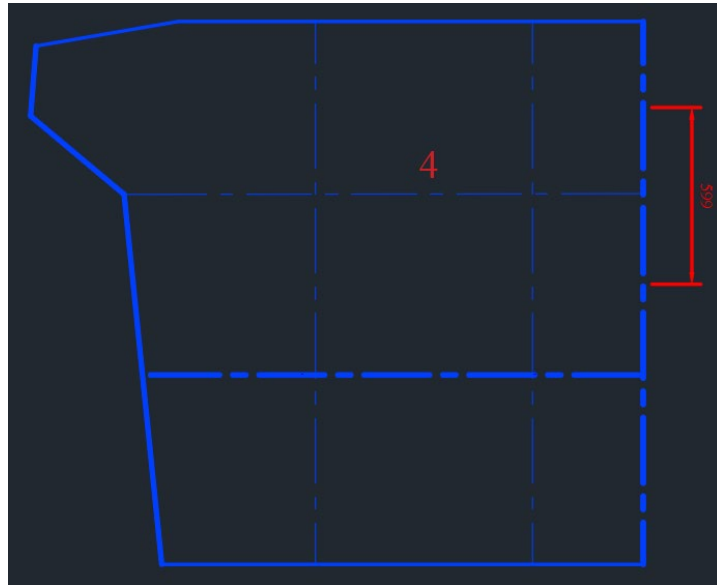
$$SM = 7.8kchsl^2$$

$$SM = 7.8 * 1.25 * 0.58 * 0.615 * 1.686 * 0.735^2$$

$$SM_{\text{min}} = 3.168 \text{ cm}^3$$

## ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Επιλέγουμε ως δευτερεύον οριζόντιο ενισχυτικό απλή λάμα (flat-bar) με πλάτος 60 mm, πάχος 8 mm και πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος 59.9 cm.



Εικόνα 34. Πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος.

a/a	dim (cm)	dim. (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	d (cm)	Axd (cm <sup>3</sup> )	Axd <sup>2</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>0</sub> (cm <sup>4</sup> )
1	59.9	0.7	41.93	0.35	14.676	5.136	1.712
2	6	0.8	4.8	3.7	17.76	65.712	14.4
SUM			46.73		32.436	70.848	16.112

$$y_1 = \frac{\Sigma(A * d)}{\Sigma(A)} = 0.694 \text{ cm}$$

$$y_2 = 6.7 - y_1 = 6.006 \text{ cm}$$

$$I_{XX} = \Sigma(A * d)^2 + \Sigma(I_0) = 86.961 \text{ cm}^4$$

$$I_{YY} = I_{XX} - A * (y_1)^2 = 64.447 \text{ cm}^4$$

$$SM_{4A} = \frac{I_{YY}}{y_1} = 92.849 \text{ cm}^3$$

$$SM_{4B} = \frac{I_{YY}}{y_2} = 10.731 \text{ cm}^3$$

$$SM_{\min} = 3.168 \text{ cm}^3 < SM_{4B} = 10.731 \text{ cm}^3$$

Εγκρίνεται.

## 4.2.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟΥ

### ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Από κανονισμό 3-2-9/5.7 (σελ. 25) η ελάχιστη ροπή αντίστασης του οριζόντιου πρωτεύοντος ενισχυτικού της φρακτής δίνεται από τον τύπο:

$$SM = 4.74kchsl^2$$

Για το k

$$k = 1.25$$

Για το c

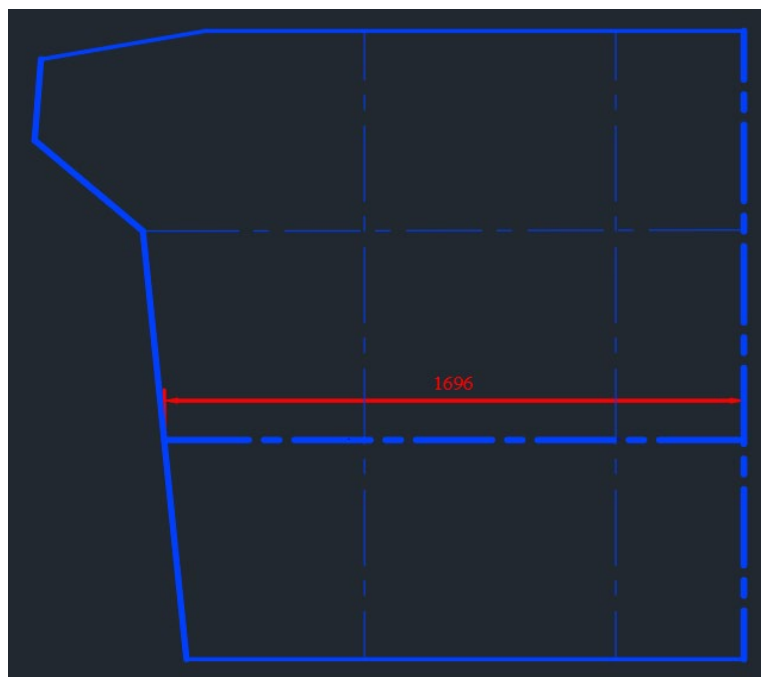
$$c = 1.00$$

Για το l

Θεωρούμε πως το πρωτεύον στηρίζει το δευτερεύον και όχι το ανάποδο.

Άρα,

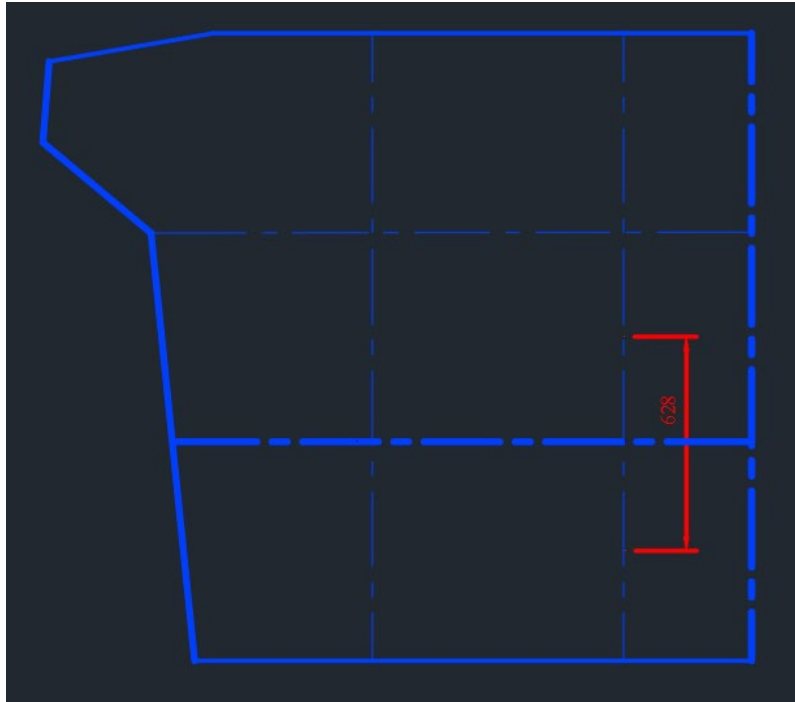
$$l = 1.696 \text{ m}$$



Εικόνα 35. Ανυποστήρικτο μήκος.

Για το s

$$s = 1.256 \text{ m}$$



Εικόνα 36. Ημιπλάτος στηριζόμενων ενισχύσεων.

### Για το h

Η απόσταση, από το μισό του l,  $h = 1.198$  m είναι μικρότερη από 6.1 m. Συνεπώς:

$$h_{\text{new}} = 0.8h + 1.22 = 2.178 \text{ m}$$

### Άρα

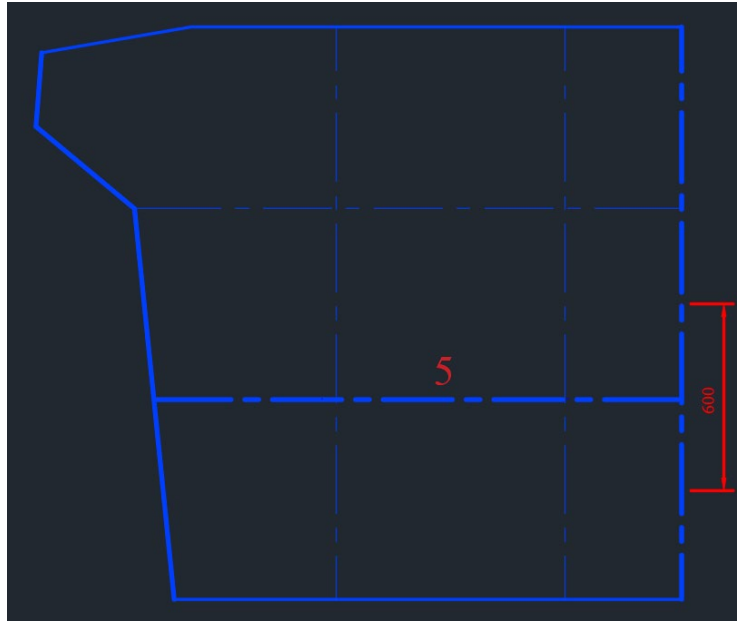
$$SM = 4.74kchsl^2$$

$$SM = 4.74 * 1.25 * 2.178 * 1.256 * 1.696^2$$

$$SM_{\text{min}} = 46.622 \text{ cm}^3$$

### ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Για την εκλογή του πρωτεύοντος ενισχυτικού θα πρέπει να υπολογίσουμε την πραγματική ροπή αντίστασης και να την συγκρίνουμε με την ελάχιστη που βρέθηκε από τους κανονισμούς, όπως υπολογίσθηκε παραπάνω. Επιλέγουμε ως πρωτεύον ενισχυτικό τύπου T (T 150X6 FB 60X6). Οι λόγοι που επιλέγεται το συγκεκριμένο ενισχυτικό είναι δύο. Πρώτον, το συγκεκριμένο ενισχυτικό υπάρχει στα πλαϊνά ελάσματα (side shells) του πλοίου και συνεπώς θα ήταν σωστό να συνεχίζει και στην φρακτή. Δεύτερον, η διάσταση του μήκους είναι σχεδόν διπλάσια από την διάσταση του πλάτους και συνεπώς το οριζόντιο ενισχυτικό θα είναι πολύ μεγαλύτερο σε μήκος, άρα θα πρέπει να είναι και πιο ενισχυμένο.



Εικόνα 37. Πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος.

Άρα,

a/a	dim (cm)	dim. (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	d (cm)	Axd (cm <sup>3</sup> )	Axd <sup>4</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>o</sub> (cm <sup>4</sup> )
1	60	0.7	42	0.35	14.7	5.145	1.715
2	15	0.6	9	8.2	73.8	605.16	168.75
3	6	0.6	3.6	16	57.6	921.6	0.108
SUM			54.6		146.1	1531.905	170.573

$$y_1 = \frac{\Sigma(A * d)}{\Sigma(A)} = 2,676 \text{ cm}$$

$$y_2 = 16.3 - y_1 = 13.624 \text{ cm}$$

$$I_{XX} = \Sigma(A * d)^2 + \Sigma(I_o) = 1702.478 \text{ cm}^4$$

$$I_{YY} = I_{XX} - A * (y_1)^2 = 1311.54 \text{ cm}^4$$

$$SM_{5A} = \frac{I_{YY}}{y_1} = 490.144 \text{ cm}^3$$

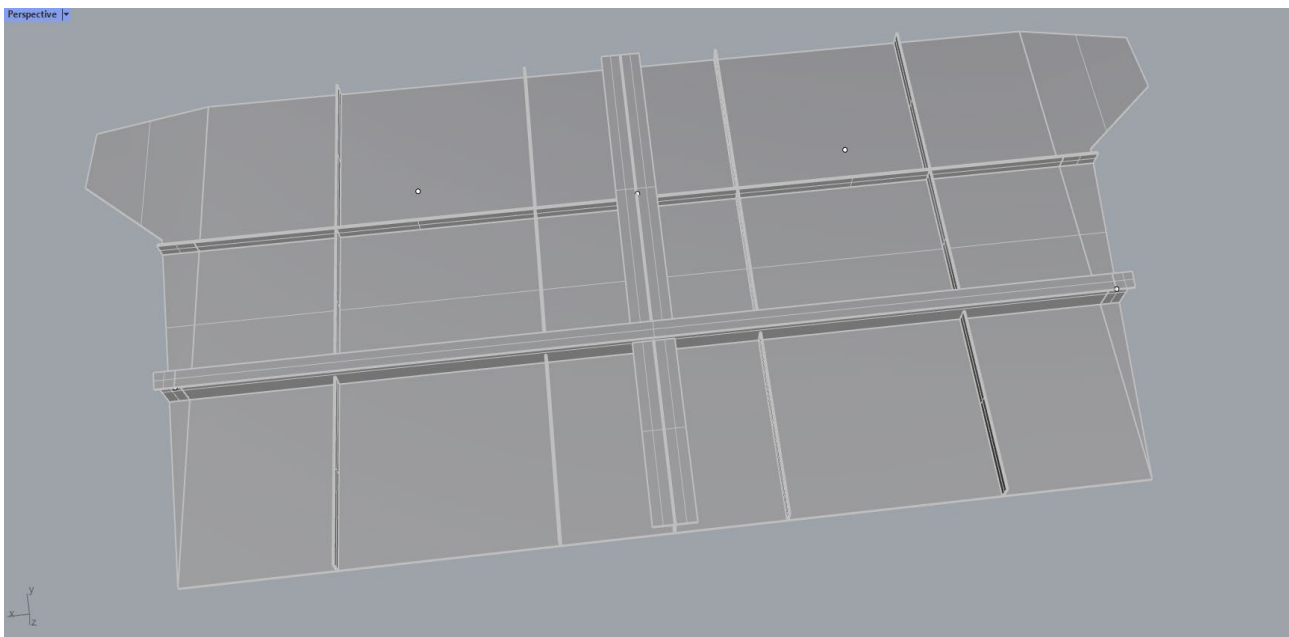
$$SM_{5B} = \frac{I_{YY}}{y_2} = 96.266 \text{ cm}^3$$

$$SM_{\min} = 46.622 \text{ cm}^3 < SM_{5B} = 96.266 \text{ cm}^3$$

Εγκρίνεται.

## 4.2.8 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ 3D ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί το τρισδιάστατο μοντέλο της φρακτής που βρίσκεται υπό μελέτη. Ο σχεδιασμός της προσωαίας φρακτής συγκρούσεως πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Rhinoceros (Rhino 3D) με βάση τις ακριβείς διαστάσεις ελασμάτων και ενισχυτικών που υπολογίστηκαν προηγουμένως, ακολουθώντας τους κανονισμούς του ABS. Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε και με την απλοποίηση των δύο ανώτερων ακριανών ενισχυτικών με κλίση (σύμφωνα με τα προηγούμενα δισδιάστατα σχέδια) σε απλά κάθετα ελάσματα ίδιων διαστάσεων.



Εικόνα 38. Το 3D μοντέλο της φρακτής.

### Το πρόγραμμα Rhinoceros (Rhino 3D)

Το πρόγραμμα Rhinoceros αποτελεί μία εμπορική εφαρμογή τρισδιάστατης μοντελοποίησης CAD. Η γεωμετρία που χρησιμοποιεί το Rhino είναι βασισμένη στην μαθηματική γεωμετρία των καμπυλών Nurbs, η οποία επικεντρώνεται στην ακριβή μαθηματική αναπαράσταση καμπυλών και επιφανειών. Το Rhino 3D χρησιμοποιείται συνήθως για βιομηχανικό αρχιτεκτονικό και ναυπηγικό σχεδιασμό. Για τον σχεδιασμό, το Rhino παρέχει μία πληθώρα εντολών για την δημιουργία και επεξεργασία γραμμών ενώ Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή και την εξαγωγή σχεδίων από ή προς άλλα λογισμικά, όπως το AutoCAD. Αυτό που κάνει το Rhino ξεχωριστό σαν πρόγραμμα είναι ότι μπορεί να δημιουργήσει σύνθετα αντικείμενα με όλες τις λεπτομέρειες τους, ειδικότερα όσον αφορά επιφάνειες, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.



### 4.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Ο έλεγχος της κάμψης στην παρούσα διπλωματική εργασία θα πραγματοποιηθεί, εκτός της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, με την χρήση διαγραμμάτων του Schade. Η πραγματοποίηση μιας τέτοιας μελέτης θα προσδώσει ακόμα μεγαλύτερο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον καθώς στο τέλος θα δοθεί η δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων. Για την μελέτη θα γίνουν υπολογισμοί την φρακτή παίρνοντας ορθογωνικό έλασμα με πλευρές  $a=3262$  mm (πλάτος φρακτής) και  $b=1840$  mm (ύψος φρακτής). Λόγω της συγκέντρωσης τάσεων που εμφανίζεται στο μοντέλο, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων θα συγκριθούν κάνοντας χρήση του βέλους κάμψης.

#### Υπολογισμός ασκούμενου φορτίου υδροστατικής πίεσης

$$P = \rho gh$$

Όπου,

$$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.806 \text{ m/s}^2$$

Για  $h = 1.84$  m (3/3 του h) θα έχω:

$$P = 18493 \text{ N/m}^2 = 0.0185 \text{ N/mm}^2$$

Επειδή η προσομοίωση θα γίνει θεωρητικά σε οριζόντιο έλασμα, παίρνουμε την μέση τιμή της τριγωνικής κατανομής της υδροστατικής πίεσης που είναι  $P/2$ . Άρα,

$$P_{\text{new}} = 0.00925 \text{ N/mm}^2$$

#### Υπολογισμός παραμέτρων διαγραμμάτων Schade

$$A) i_a = \frac{I_{na}}{S_a} + 2 \left( \frac{I_a - I_{na}}{b} \right) = 14606.126 \text{ mm}^3$$

Όπου,

$$I_{na} = I_{O4} = 644469.424 \text{ mm}^4$$

$$S_a = 613.3 \text{ mm} \quad (1840/3)$$

$$I_a = I_{O5} = 13115400.88 \text{ mm}^4$$

$$b = 1840 \text{ mm}$$

$$B) i_b = \frac{I_{nb}}{S_b} + 2 \left( \frac{I_b - I_{nb}}{a} \right) = 3963.878 \text{ mm}^3$$

Όπου,

$$I_{nb} = I_{O2} = 493611.418 \text{ mm}^4$$

$$S_b = 543.667 \text{ mm} \quad (3262/6)$$

$$I_b = I_{O3} = 5477862.851 \text{ mm}^4$$

$$a = 3262 \text{ mm}$$

$$Γ) \rho = \frac{a}{b} \sqrt[4]{\frac{i_b}{i_a}} = 1.28$$

Δ)  $\eta = 1.0$  λόγω περιμετρικής πάκτωσης

### Υπολογισμός βέλους κάμψης

$$w = k \frac{pb^4}{Ei_b}$$

Όπου,

$k = 0.0018$  από διάγραμμα Schade για βέλος κάμψης (παράρτημα).

$$p = 0.00925 \text{ N/mm}^2$$

$$b = 1840 \text{ mm}$$

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$i_b = 3963.878 \text{ mm}^3$$

Άρα,

$$w = 0.24 \text{ mm}$$

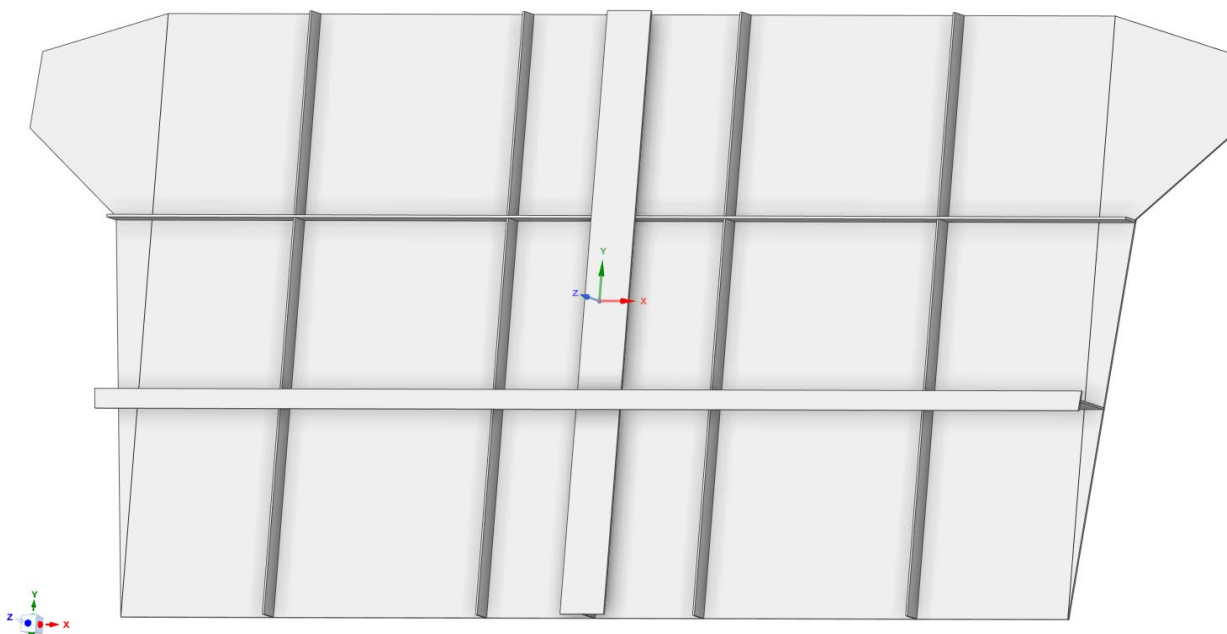
στο κέντρο του ελάσματος.

## 4.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

### 4.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Λόγω της γενικότερης περιέργης γεωμετρίας της φρακτής καθώς και για την εξαγωγή ορθών αποτελεσμάτων, θα εφαρμοστούν διαφορετικές αναλύσεις στο μοντέλο, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μια πλήρης εικόνα ως προς τις τάσεις και παραμορφώσεις που εμφανίζονται σε αυτό. Οι προσεγγίσεις αυτές θα κινηθούν σε δύο άξονες. Ανάλυση με διαφορετικό μέγεθος στοιχείων πλέγματος και ανάλυση με διαφορετικές γεωμετρικές στοιχείων πλέγματος (όπως τα τετράεδρα στοιχεία που πρέπει να αποφεύγονται αλλά στα πλαίσια του ακαδημαϊκού ενδιαφέροντος θα χρησιμοποιηθούν). Στο τέλος θα συγκριθούν τα παραπάνω αποτελέσματα αρχικά μεταξύ τους, στην συνέχεια με τα όρια των κανονισμών και τελικώς με τα αποτελέσματα της μελέτης αντοχής μέσω διαγραμμάτων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η μελέτη του βέλους κάμψης, διότι είναι το πιο αξιόπιστο μέγεθος για την κατανόηση της γενικότερης συμπεριφοράς της μεταλλικής κατασκευής καθώς και για σύγκριση των τιμών που λαμβάνει για διάφορα μεγέθη πλέγματος. Για την προσέγγιση του προβλήματος θα εφαρμοστούν οι παρακάτω αναλύσεις και ξεκινώντας με το μέγιστο δυνατό πλέγμα των 30 mm λόγω του κανονισμού 3-2-20/3.5 που απαιτεί τουλάχιστον 3 κόμβους για την περιγραφή κάθε μεταλλικού στοιχείου. Συνεπώς, με μικρότερη διάσταση ενισχυτικού τα 60 mm, καταλήγουμε στις εξής:

- A. Ανάλυση μοντέλου από εξάεδρα στοιχεία με μέγεθος πλέγματος 30 mm.
- B. Ανάλυση μοντέλου από εξάεδρα στοιχεία με μέγεθος πλέγματος 20 mm.
- Γ. Ανάλυση μοντέλου από εξάεδρα στοιχεία με μέγεθος πλέγματος 10 mm.
- Δ. Ανάλυση μοντέλου από εξάεδρα στοιχεία με μέγεθος πλέγματος 8 mm.
- Ε. Ανάλυση μοντέλου από τετράεδρα στοιχεία με μέγεθος πλέγματος 8 mm.



Εικόνα 39. Το μοντέλο της φρακτής στο SpaceClaim.

## 4.4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### Εισαγωγή δεδομένων υλικού κατασκευής

Το πρώτο στάδιο της μελέτης ξεκινά με την εισαγωγή του κατάλληλου υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το μοντέλο της φρακτής και των αντίστοιχων μεγεθών. Το στάδιο αυτό είναι κοινό για όλες τις προσεγγίσεις-μεθοδολογίες επίλυσης που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Το υλικό κατασκευής είναι κοινός ναυπηγικός χάλυβας κατηγορίας A (grade A). Ανοίγοντας το κατάλληλο Data, παρατηρούμε πως στην στήλη Materials υπάρχει προεπιλεγμένο το υλικό Structural Steel, το οποίο σημαίνει κατασκευαστικός χάλυβας. Το ANSYS δεν προσφέρει την δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένου ναυπηγικού χάλυβα και συνεπώς, για να μπορέσει να προσομοιωθεί το πρόβλημα με την πραγματικότητα, αποδεχόμαστε την παραπάνω επιλογή με την προϋπόθεση πως θα αλλαχτούν τα όρια αντοχής και τα υπόλοιπα αντίστοιχα μεγέθη. Αρχικά, εισάγουμε από κάτω την σωστή τιμή του ορίου διαρροής (Tensile Yield Strength) και συγκεκριμένα 235 Mpa για χάλυβα grade A. Το όριο θραύσης (Tensile Ultimate Strength) έχει οριστεί ως προεπιλογή στα 460 Mpa. Ο ναυπηγικός χάλυβας grade A έχει τιμή ορίου θραύσης που κυμαίνεται από 400 έως 520 Mpa και άρα γίνεται αποδεκτή η τιμή αυτή διότι είναι ο μέσος όρος. Στην συνέχεια, η τιμή του λόγου Poisson (Poisson's ratio) διατηρείται στο 0.3 (ισχύει για τους περισσότερους χάλυβες) ενώ το μέτρο του Young (Young Modulus) ή μέτρο Ελαστικότητας E διατηρείται και αυτό στην τιμή των 200 Gpa.

The screenshot displays the ANSYS Engineering Data interface. The main window shows the 'Contents of Engineering Data' table with 'Structural Steel' selected. The 'Properties of Outline Row 3: Structural Steel' table is expanded, showing various material properties. The 'Table of Properties Row 2: Structural Steel Field Variables' table is also visible, showing default values for Temperature and Mean Stress.

Property	Value	Unit
Density	7800	kg m <sup>-3</sup>
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,2E-05	C <sup>-1</sup>
Isotropic Elasticity	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus	200	GPa
Poisson's Ratio	0,3	
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
Tensile Yield Strength	235	MPa
Compressive Yield Strength	235	MPa
Tensile Ultimate Strength	460	MPa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa

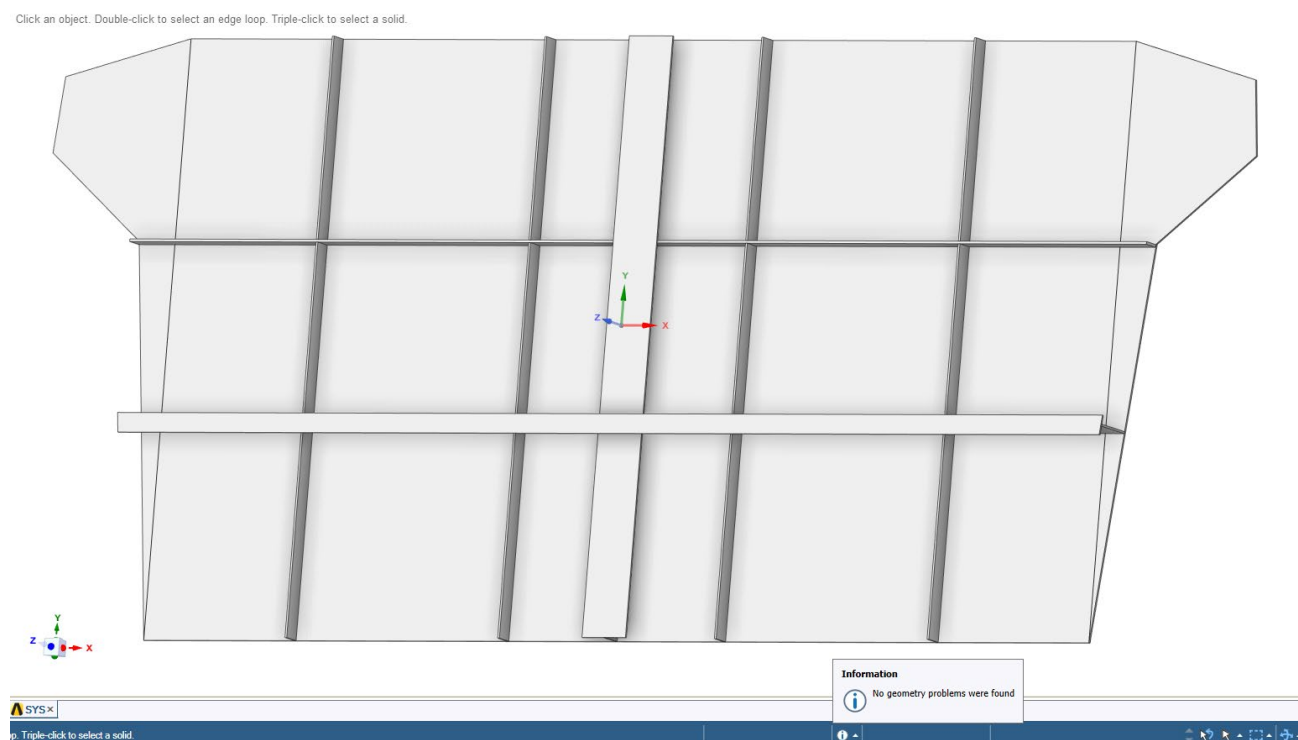
Variable Name	Unit	Default Data	Lower Limit	Upper Limit
Temperature	C	22	Program Controlled	Program Controlled
Mean Stress	Pa	0	Program Controlled	Program Controlled

Εικόνα 40. Εισαγωγή υλικού και αντίστοιχων μεγεθών.

Η πυκνότητα του ναυπηγικού χάλυβα διευκρινίζεται στους κανονισμούς των Νηογνωμόνων. Σύμφωνα με το κεφ. 2, η πυκνότητα του χάλυβα βαθμού A δίνεται ως 7.8 gr/cm<sup>3</sup>. Συνεπώς, αλλάζει αισθητά και η πυκνότητα σε σχέση με την προεπιλεγμένη τιμή.

## Έλεγχος γεωμετρίας

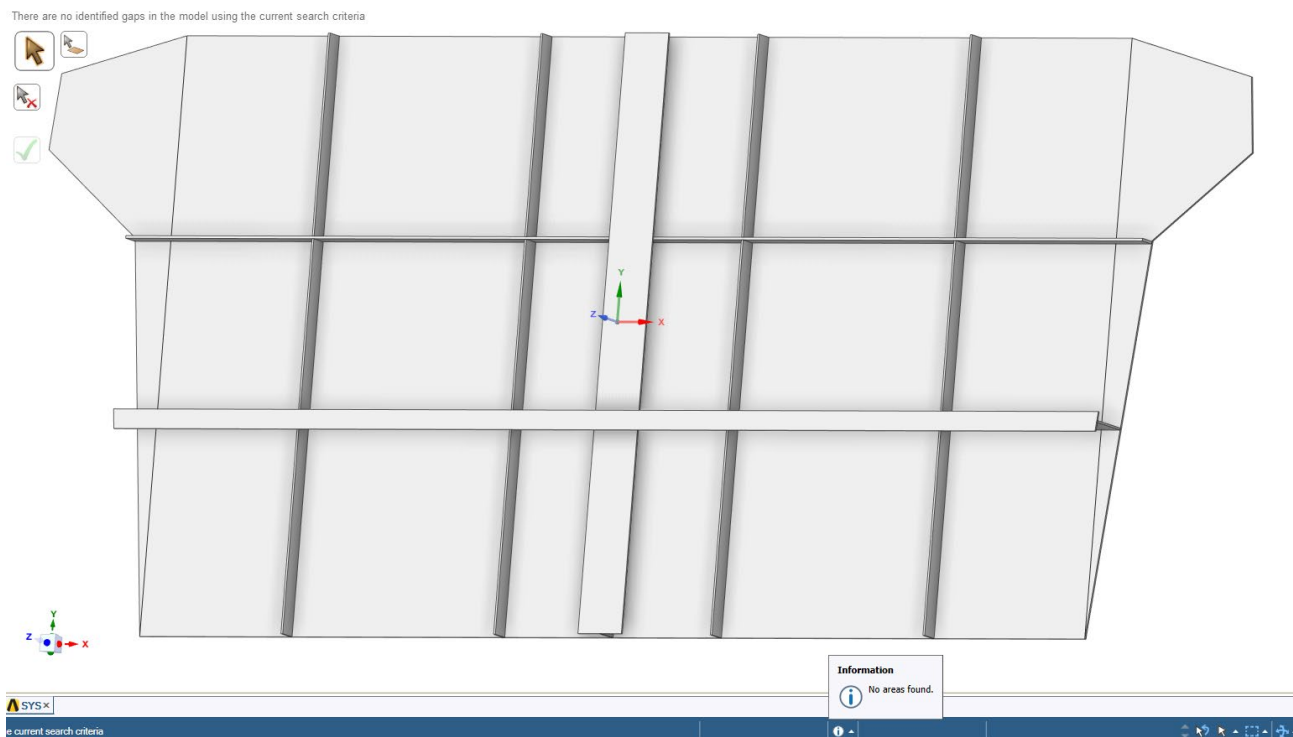
Το επόμενο στάδιο της μελέτης αποτελείται από τον έλεγχο της ορθότητας του μοντέλου και την εύρεση σφαλμάτων τόσο στην γεωμετρία όσο και στην ένωση των επιμέρους μικρότερων στοιχείων της φρακτής (ελάσματα, ενισχυτικά). Το λογισμικό ANSYS επιτρέπει τον έλεγχο του μοντέλου κατά την εισαγωγή της γεωμετρίας στο SpaceClaim και εμφανίζει τα κατάλληλα μηνύματα. Αρχικά, εκτελείται πλήρης έλεγχος για γεωμετρικές ατέλειες (geometry problems) ή προβλήματα σχεδίασης της φρακτής εκτελώντας τις κατάλληλες εντολές από το command line. Κάτω δεξιά εμφανίζει τα μηνύματα με τα αποτελέσματα του ελέγχου που πραγματοποιήθηκε.



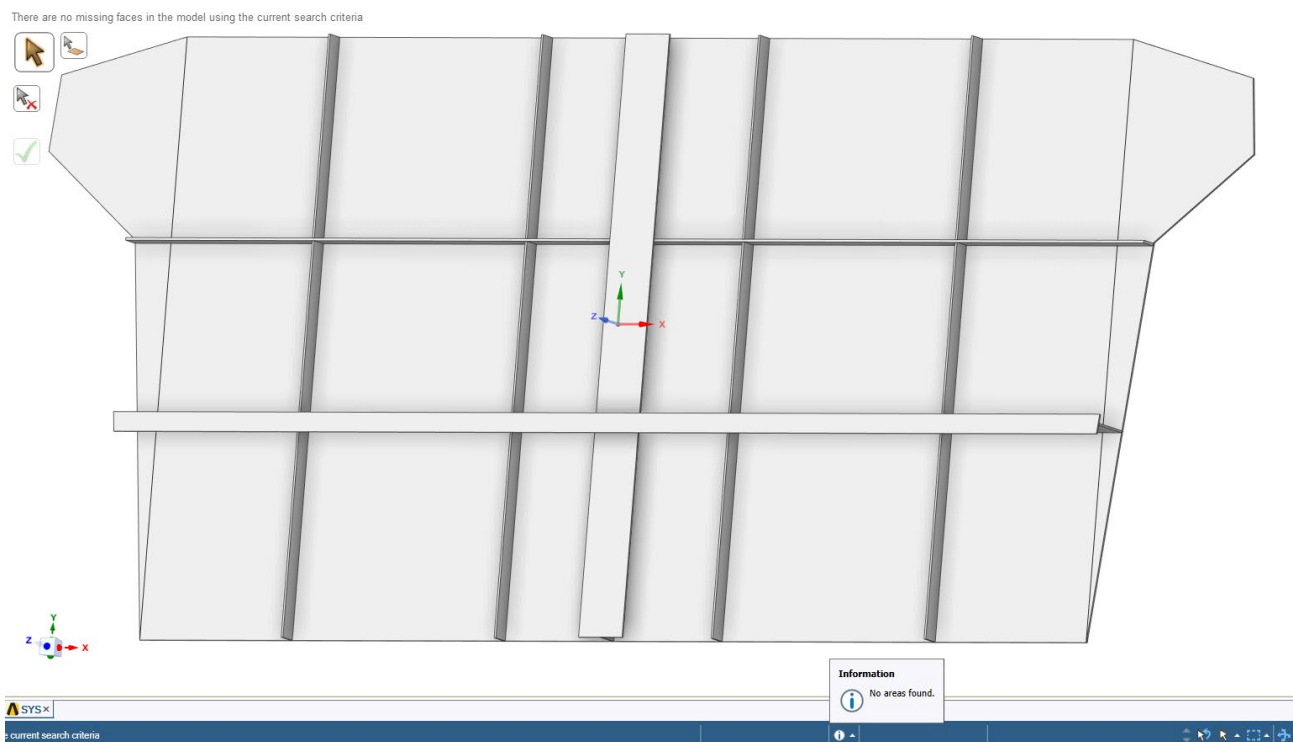
Εικόνα 41. Έλεγχος γεωμετρικών σφαλμάτων.

Στο παρόν μοντέλο, κανένα γεωμετρικό πρόβλημα δεν εμφανίζεται. Συνεπώς, τόσο η γεωμετρία της φρακτής όσο και τα επιμέρους κατασκευαστικά στοιχεία είναι σωστά σχεδιασμένα και ενωμένα. Η διαδικασία αυτή είναι κοινή για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης (A,B,Γ,Δ,E) και υποχρεωτική πριν συνεχιστεί η μελέτη, διότι οποιοδήποτε γεωμετρικό ή κατασκευαστικό σφάλμα θα οδηγήσει σε προβλήματα ανάλυσης του μοντέλου όπως δημιουργία εσφαλμένου πλέγματος ή λανθασμένα αποτελέσματα.

Στην συνέχεια πραγματοποιούνται και κάποιοι ακόμα έλεγχοι στην σχεδίαση και γεωμετρία του μοντέλου χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες εντολές, όπως ο έλεγχος για την ύπαρξη κενών (gaps) μεταξύ των επιφανειών των ενισχυτικών και του ελάσματος καθώς και για επιφάνειες που δεν εμφανίζονται (missing faces) στο μοντέλο.



Εικόνα 42. Έλεγχος για την ύπαρξη κενών μεταξύ των στοιχείων του μοντέλου.



Εικόνα 43. Έλεγχος για την ύπαρξη μη εμφανιζόμενων επιφανειών στο μοντέλο.

## Ομαδοποίηση στοιχείων (One component model)

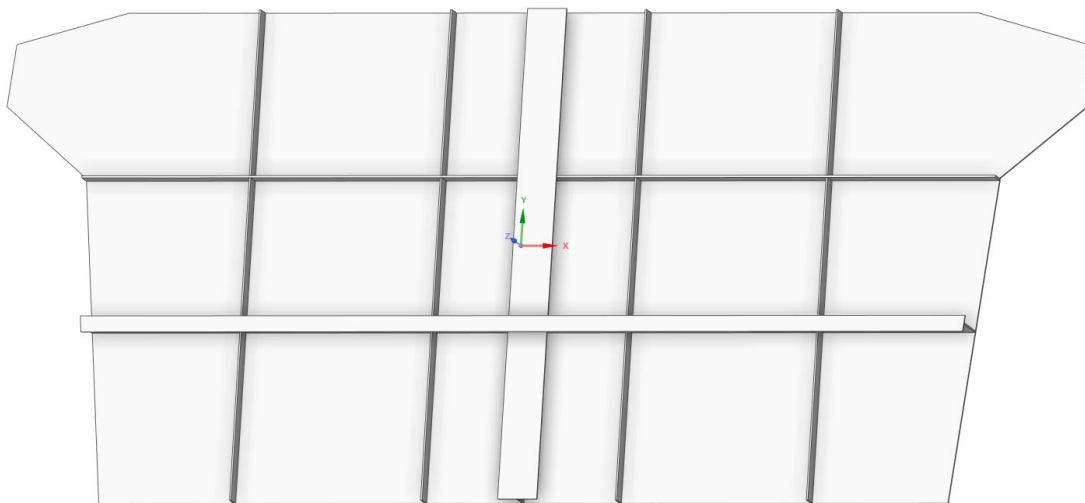
Τελευταίο βήμα είναι η δημιουργία ενός μοντέλου όπου όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία είναι ομαδοποιημένα (merged). Δημιουργείται, δηλαδή, μοντέλο με ενωμένα στοιχεία που όμως σε καμία περίπτωση δεν διαβάζεται ως ενιαίο σώμα. Επιλέγοντας solid από κάθε στοιχείο και κάνοντας χρήση κατάλληλης εντολής, δημιουργείται το Component. Η παραπάνω διαδικασία είναι απαραίτητη για να μπορέσει το πρόγραμμα να δημιουργήσει ενιαίο πλέγμα με ενωμένους κόμβους μεταξύ των στοιχείων (node merging). Η δημιουργία του Component είναι αναγκαία για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης.



Εικόνα 44. Δημιουργία Component model.

## Ένωση στοιχείων (Combined model)

Για την περίπτωση Ε θα γίνει χρήση της εντολής Combine για το έλασμα της φρακτής. Με τον τρόπο αυτό το πρόγραμμα θα διαβάσει ένα ενιαίο σώμα ελάσματος και θα δημιουργήσει τετράεδρα στοιχεία στο πλέγμα λόγω της περιέργης γεωμετρίας.

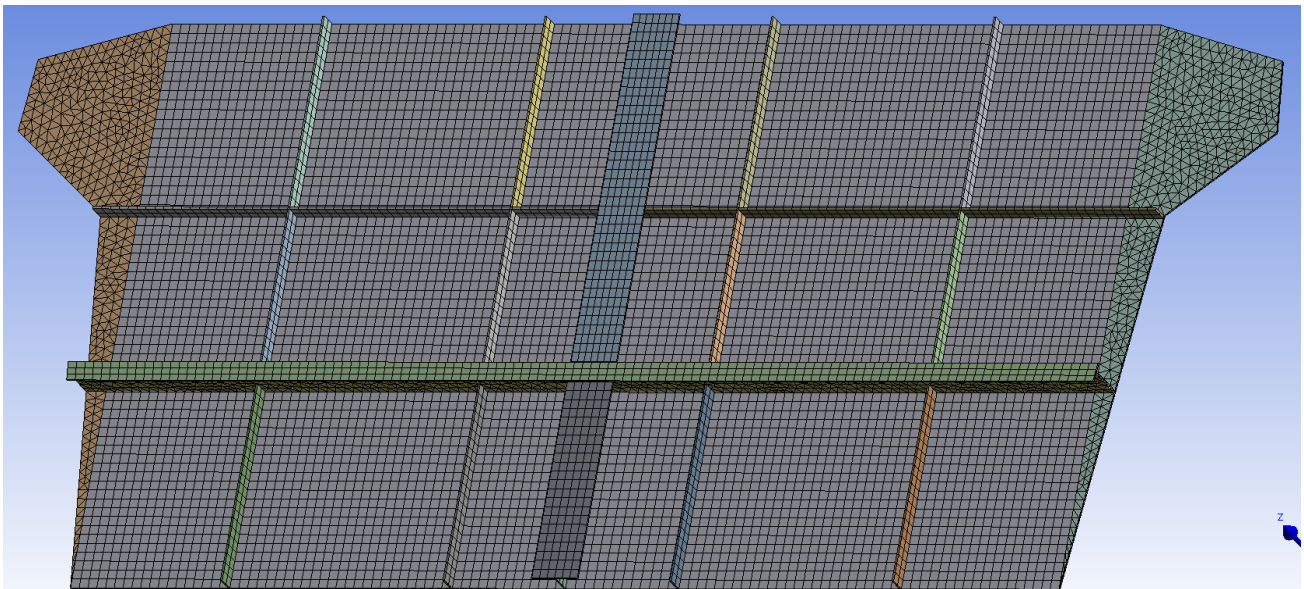


Εικόνα 45. Δημιουργία Combined model.

## **A. Ανάλυση μοντέλου από εξάεδρα στοιχεία με μέγεθος πλέγματος 30 mm.**

### **Δημιουργία πλέγματος**

Το επόμενο στάδιο της μελέτης είναι η δημιουργία του πλέγματος του μοντέλου. Η διαδικασία αυτή θα πραγματοποιηθεί στο Mechanical interface του προγράμματος. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο της διπλωματικής, το πλέγμα που θα δημιουργηθεί για την ανάλυση θα πρέπει να πληρεί τις προϋποθέσεις των κανονισμών του ABS για τουλάχιστον 3 κόμβους. Για την συγκεκριμένη ανάλυση επιλέγουμε στοιχεία πλέγματος με διαστάσεις πλευρών 30 mm, δηλαδή 0.03 m. Με μικρότερη διάσταση ενισχυτικού ή ελάσματος στο μοντέλο να είναι το πλάτος των απλών ενισχυτικών 60 mm, πληρείται ο κανονισμός. Εκτελώντας τις κατάλληλες εντολές στο Mechanical και συγκεκριμένα στο mesh, δημιουργούμε το παρακάτω πλέγμα.



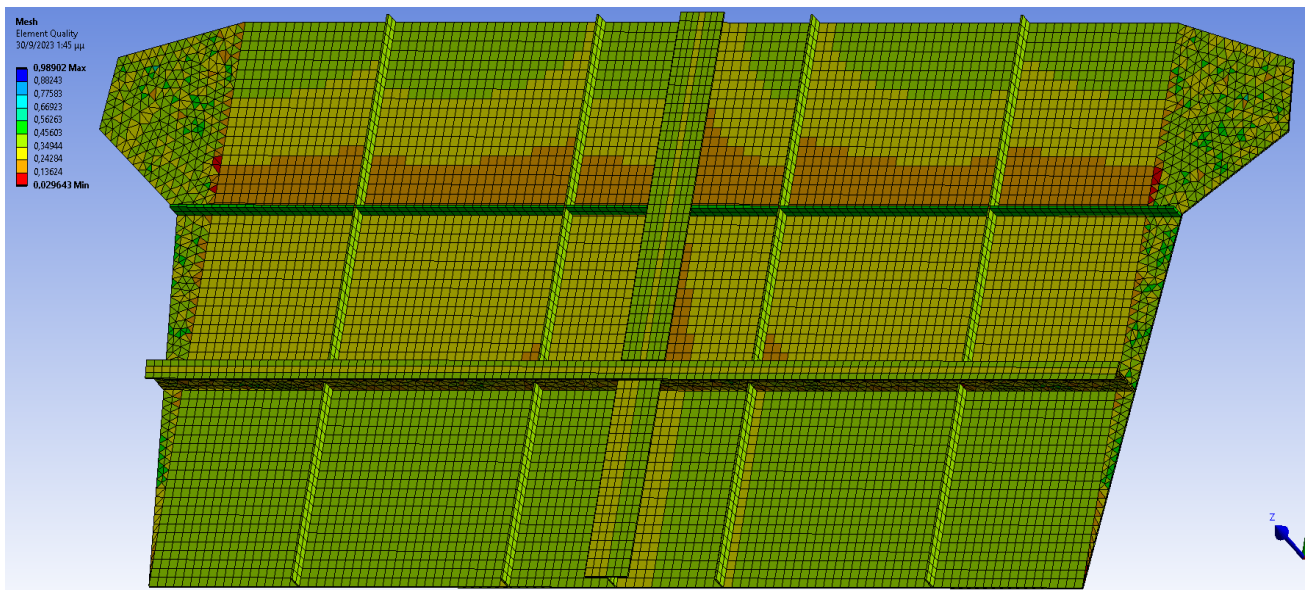
Εικόνα 46. Πλέγμα μοντέλου με εξαεδρικά στοιχεία (mesh).

Τα τετράεδρα στοιχεία έχουν περιοριστεί στο ελάχιστο. Αυτό επετεύχθη λόγω της ομαδοποίησης των στοιχείων της φρακτής σε component. Συμπερασματικά, είναι ένα ικανοποιητικό πλέγμα με την πλειοψηφία των στοιχείων να είναι εξαεδρικά.

### **Έλεγχος πλέγματος**

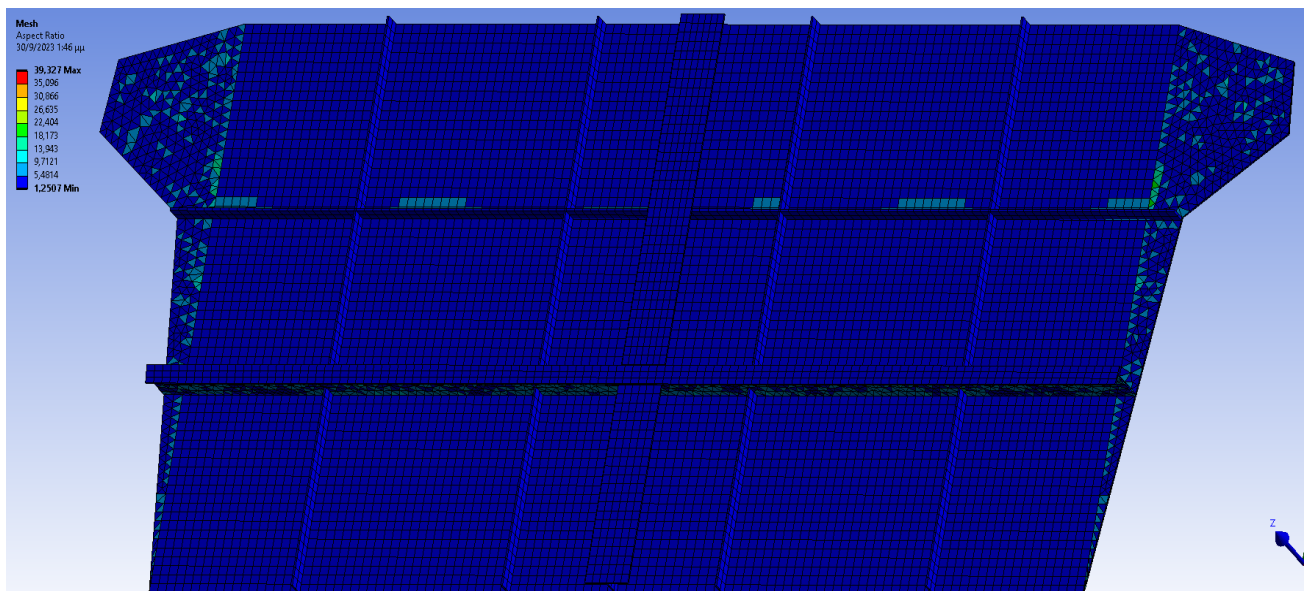
Το λογισμικό ANSYS δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να ελέγξει ποιοτικά το πλέγμα το οποίο δημιουργήθηκε. Οι επιλογές ελέγχου εκτελούνται από τον πίνακα ρύθμισης του πλέγματος και είναι η ποιότητα του στοιχείου (element quality), η αναλογία των πλευρών του (aspect ratio), η στρεβλότητα (skewness) κ.α. Πολύ σημαντικός επίσης έλεγχος για το πλέγμα είναι η διασφάλιση πως όλοι οι κόμβοι των στοιχείων ταυτίζονται μεταξύ τους. Ο έλεγχος ξεκινά με την ποιότητα των στοιχείων.





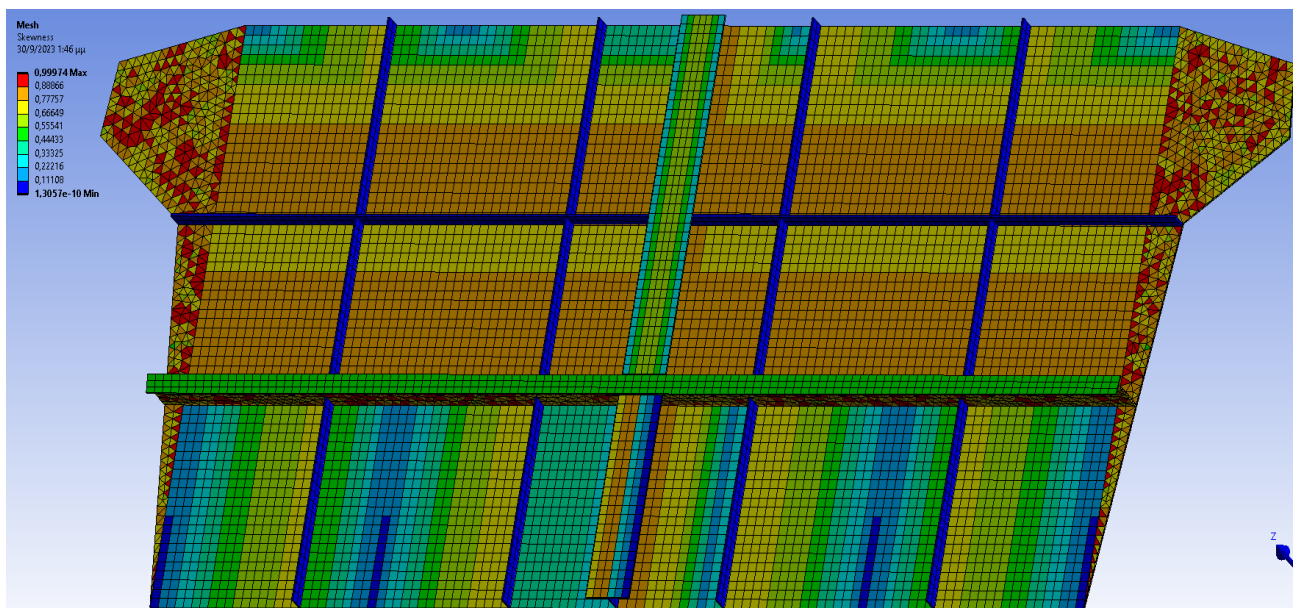
Εικόνα 47. Ποιότητα στοιχείων (element quality).

Η ποιότητα των στοιχείων είναι από καλή έως μέτρια. Αυτό οφείλεται στο μέγεθος του πλέγματος που δεν είναι αρκετά αναλυτικό σε σχέση με το μέγεθος του μοντέλου. Για καλύτερη ποιότητα θα πρέπει τα στοιχεία να μικρύνουν και να προσδώσουν μεγαλύτερη ακρίβεια. Γενικότερα, ισχύει ο κανόνας πως όσο πιο μικρές είναι οι διαστάσεις των στοιχείων του πλέγματος τόσο καλύτερη είναι και η ποιότητα αυτών. Ο έλεγχος συνεχίζεται με την αναλογία των πλευρών των στοιχείων.



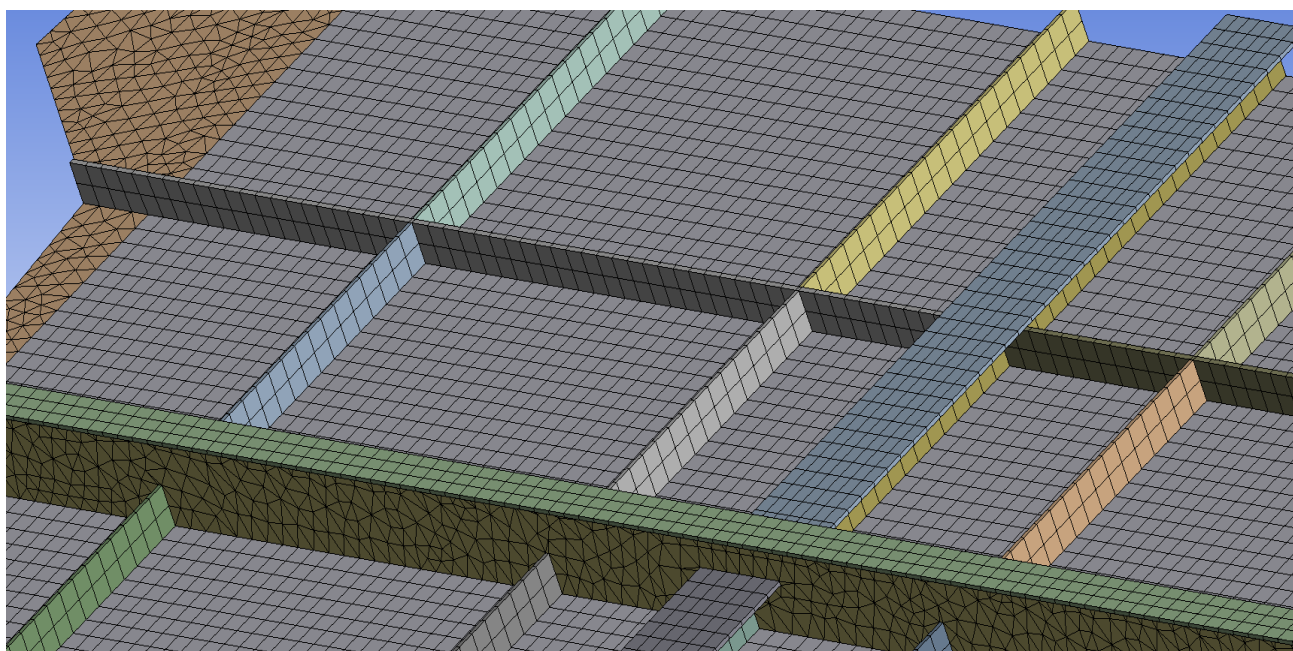
Εικόνα 48. Αναλογίες πλευρών στοιχείων (aspect ratio).

Οι αναλογίες των στοιχείων των πλευρών είναι εξαιρετικές διότι το μοντέλο αποτελείται στην πλειοψηφία του από εξάεδρα στοιχεία. Επόμενος έλεγχος είναι η στρεβλότητα των στοιχείων.



Εικόνα 49. Στρεβλότητα στοιχείων (skewness).

Τα αποτελέσματα στρεβλότητας των στοιχείων δεν είναι ικανοποιητικά. Ο λόγος οφείλεται στο μέγεθος των στοιχείων σε σχέση με το μέγεθος της φρακτής. Εν συνεχεία, πραγματοποιείται ο έλεγχος για την ταύτιση των κόμβων των στοιχείων σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου (node merging).



Εικόνα 50. Ενώσεις κόμβων στοιχείων (node merging).

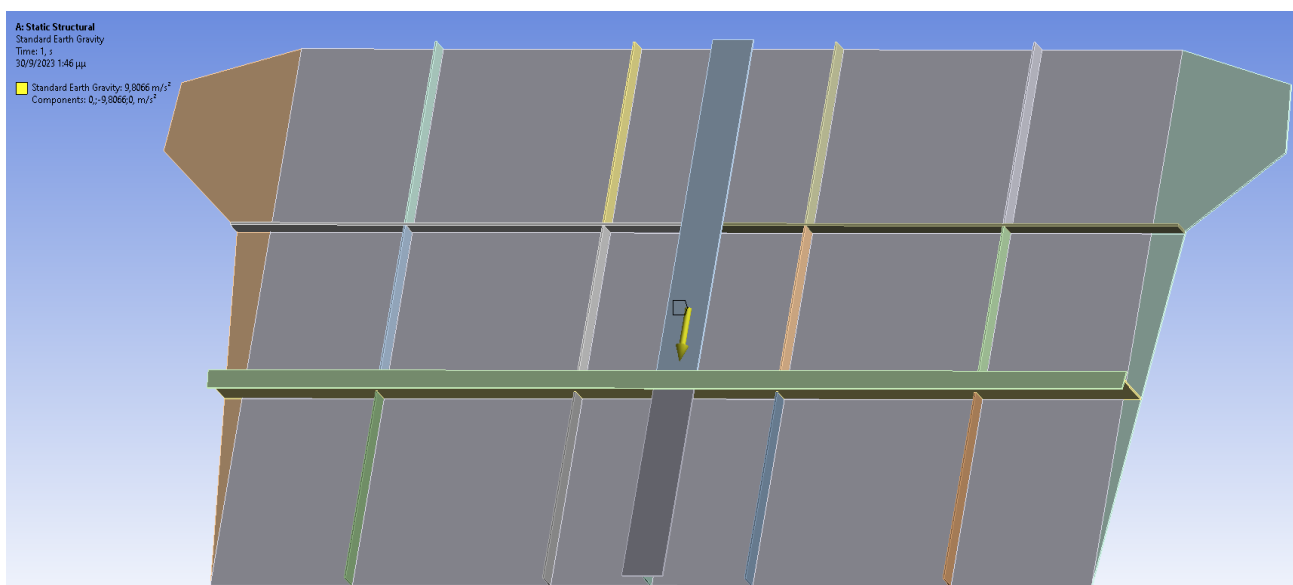
Παρατηρούμε πως όλοι οι κόμβοι των στοιχείων ταυτίζονται. Συνεπώς, το πλέγμα πληρεί την βασική προϋπόθεση για να χαρακτηριστεί σωστό.

## Εισαγωγή δυνάμεων

Οι δυνάμεις που θα ασκηθούν στο μοντέλο της φρακτής είναι συνολικά οι εξής:

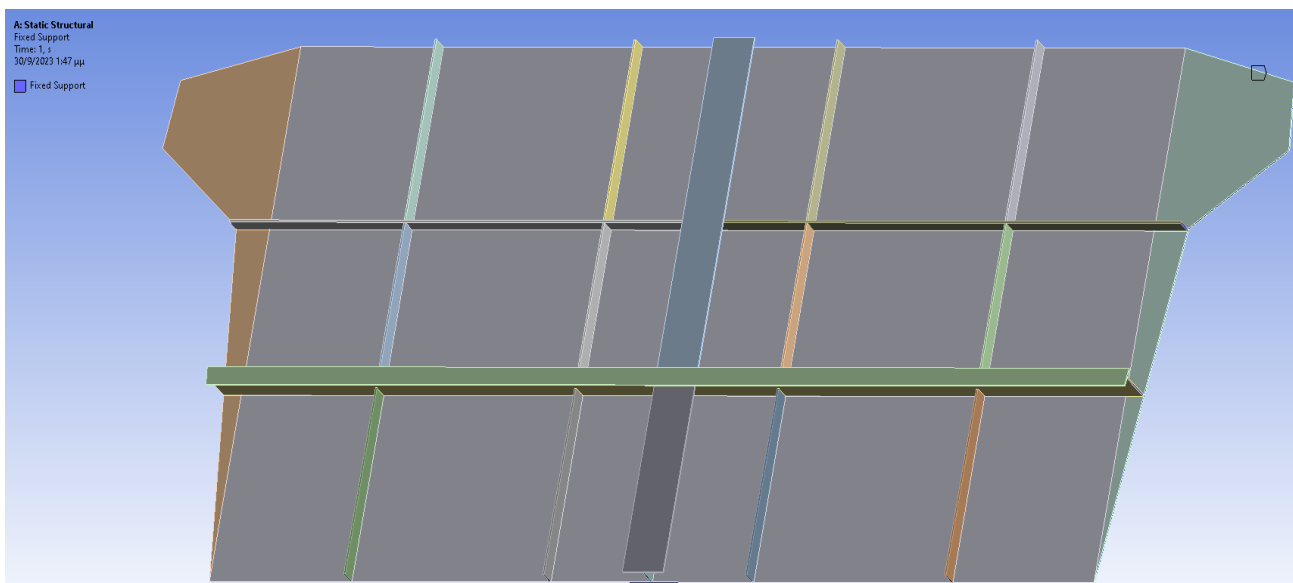
1. Βαρύτητα.
2. Πάκτωση περιμετρικά της φρακτής.
3. Υδροστατική πίεση.

Κάθε μία από τις παραπάνω δυνάμεις εισάγεται σε διαφορετικό πίνακα και με διαφορετικές παραμέτρους. Το πρώτο βήμα είναι η εφαρμογή της βαρύτητας και συγκεκριμένα θα εισαχθεί η τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας  $9.806 \text{ m/s}$  στον πίνακα δυνάμεων του static structural. Το λογισμικό εκτός από τιμή ζητά και διεύθυνση του διανύσματος της βαρύτητας, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο άξονας  $y$  και συγκεκριμένα ο  $-y$ . Το σώμα που επιλέγεται και στο οποίο θα ασκείται η βαρυτική δύναμη (ζητείται από τον πίνακα) είναι ολόκληρο το μοντέλο της φρακτής. Συνεπώς, καταχωρούνται τα ανάλογα δεδομένα στο πρόγραμμα.



Εικόνα 51. Βαρυτική δύναμη (Gravity force).

Το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή της περιμετρικής πάκτωσης. Με την δημιουργία περιμετρικής πάκτωσης επιτυγχάνεται η προσομοίωση της μελέτης στο πραγματικό πρόβλημα. Αυτό συμβαίνει διότι η φρακτή στο πλοίο είναι περιμετρικά συγκολλημένη με το έλασμα του καταστρώματος (deck plate) και το πλαϊνό έλασμα (shell plate). Περιμετρική συγκόλληση σημαίνει πάκτωση. Για την εφαρμογή, ζητείται να επιλέξουμε τις επιφάνειες που θα πρέπει να είναι πακτωμένες. Στην συνέχεια, με χρήση κατάλληλης εντολής εμφανίζεται το αντίστοιχο βέλος.



Εικόνα 52. Περιμετρική πάκτωση (Fixed support).

Τελευταίο στάδιο πριν την εξαγωγή των αποτελεσμάτων είναι η εφαρμογή της υδροστατικής πίεσης. Η υδροστατική πίεση είναι ουσιαστικά η δύναμη που θα εφαρμοστεί με την μορφή απλής πίεσης. Η υδροστατική πίεση θα εφαρμοστεί στην φρακτή με ύψος πλήρωσης το μέγιστο ύψος της φρακτής (1840 mm) που είναι και η δυσμενέστερη κατάσταση. Πρωτού προχωρήσουμε σε εισαγωγή αυτών των δεδομένων, το πρόγραμμα ζητά την επιλογή των βρεχόμενων επιφανειών και την εισαγωγή αυτών στον πίνακα δεδομένων. Οι επιφάνειες που επιλέγονται για την εφαρμογή της υδροστατικής πίεσης είναι η επιφάνεια του ελάσματος της φρακτής που δεν διαθέτει ενισχυτικά. Στο πλοίο, η βρεχόμενη επιφάνεια είναι η πλευρά με τα ενισχυτικά, όμως για χάριν ευκολίας και αμεσότητας επιλέγεται η πίσω πλευρά. Τα αποτελέσματα και για τις δύο πλευρές του ελάσματος δεν παρουσιάζουν απόκλιση.

Εισάγουμε τα παρακάτω δεδομένα στο πίνακα της υδροστατικής πίεσης:

i) Πυκνότητα ρευστού (Fluid Density) =  $1025 \text{ kg/m}^3$  για θαλασσινό νερό.

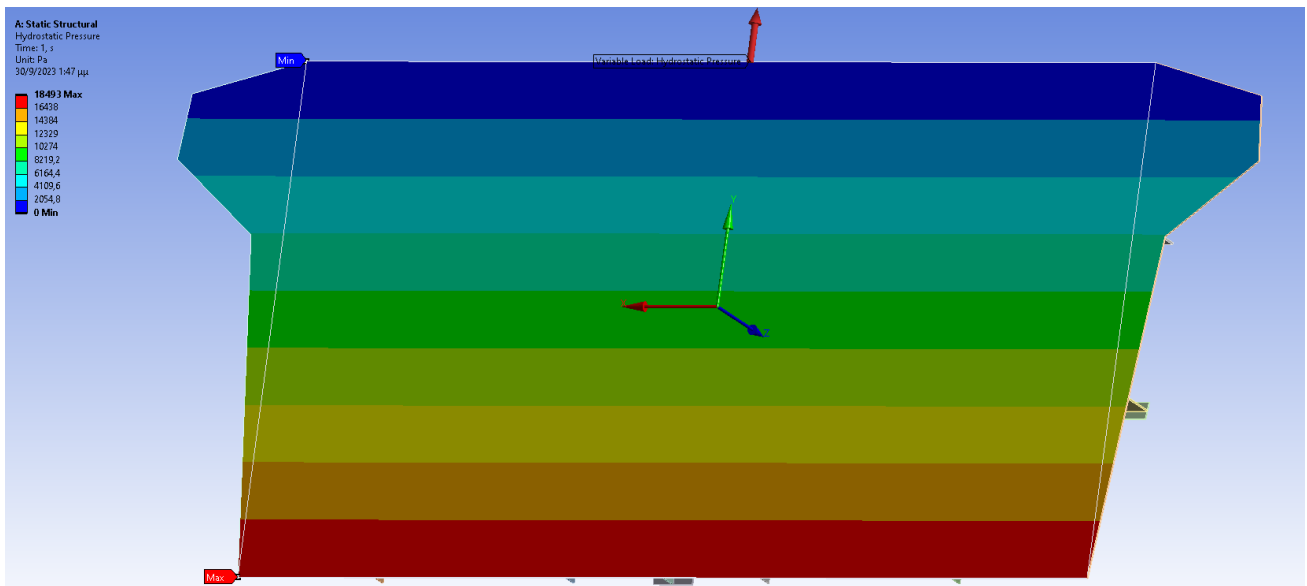
ii) Μέτρο (Magnitude) =  $9.81 \text{ m/s}^2$  στον άξονα y (y component).

Για την εισαγωγή του μέτρου, θα πρέπει να έχουμε επιλέξει την ανάλυση του μοντέλου σύμφωνα με τα στοιχεία του (Define by Components).

iii) Ύψος πλήρωσης (Free surface location) = 0.92 m.

Η παραπάνω τιμή προκύπτει διότι το λογισμικό θεωρεί το μέσον του ύψους της φρακτής (0.92 m) ως αρχικές συντεταγμένες του βέλους της υδροστατικής πίεσης (0,0,0). Συνεπώς, για να βρούμε τις τιμές πίεσης στα 1.84 m (3/3 της φρακτής), θα πρέπει να αυξήσουμε το αρχικό ύψος (0.92 m) με την διαφορά που προκύπτει από το τελικό ύψος πλην του αρχικού. Άρα, εισάγουμε στο αντίστοιχο κενό y coordinate την τιμή 0.92 m.

Μετά την εφαρμογή της υδροστατικής πίεσης, παίρνουμε το παρακάτω αποτέλεσμα όπου η μέγιστη τιμή εμφανίζεται, φυσιολογικά, στο κάτω μέρος της φρακτής.



Εικόνα 53. Υδροστατική πίεση για ύψος πλήρωσης 1.84 m (Hydrostatic pressure).

Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα του ANSYS, προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή υδροστατικής πίεσης είναι:

$$P_{\max} = 18493 \text{ N/m}^2$$

Από 4.3/σελ.70 της διπλωματικής έχει υπολογιστεί από τύπο ότι η μέγιστη υδροστατική πίεση έχει τιμή:

$$P_{\max} = 18493 \text{ N/m}^2$$

Συμπεραίνουμε πως η τιμή της υδροστατικής πίεσης έχει υπολογιστεί σωστά διότι οι παραπάνω τιμές συμπίπτουν.

### Επίλυση προβλήματος

Αφού έχουν καταχωρηθεί όλα τα παραπάνω δεδομένα, είμαστε σε θέση να επιλύσουμε το πρόβλημα αντοχής της προωραίας φρακτής συγκρούσεως. Τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν κυρίως είναι τα εξής:

- i) Ισοδύναμη τάση Von-Mises (Equivalent stress Von-Mises).
- ii) Ολική παραμόρφωση (Total Deformation).

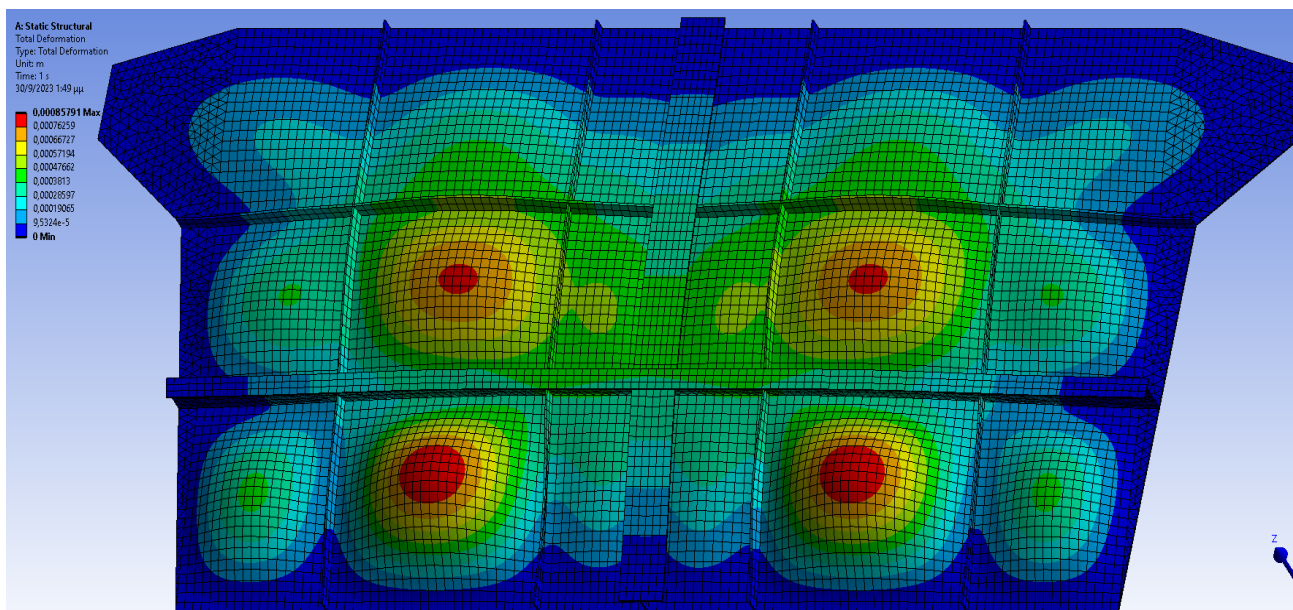
Από την ολική παραμόρφωση μπορούμε να εξάγουμε αποτελέσματα για το βέλος κάμψης της φρακτής σε όλα τα σημεία.

Έχοντας επιλέξει τα παραπάνω και μετά την χρήση της εντολής Solve, παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.



## Μέγιστο βέλος κάμψης

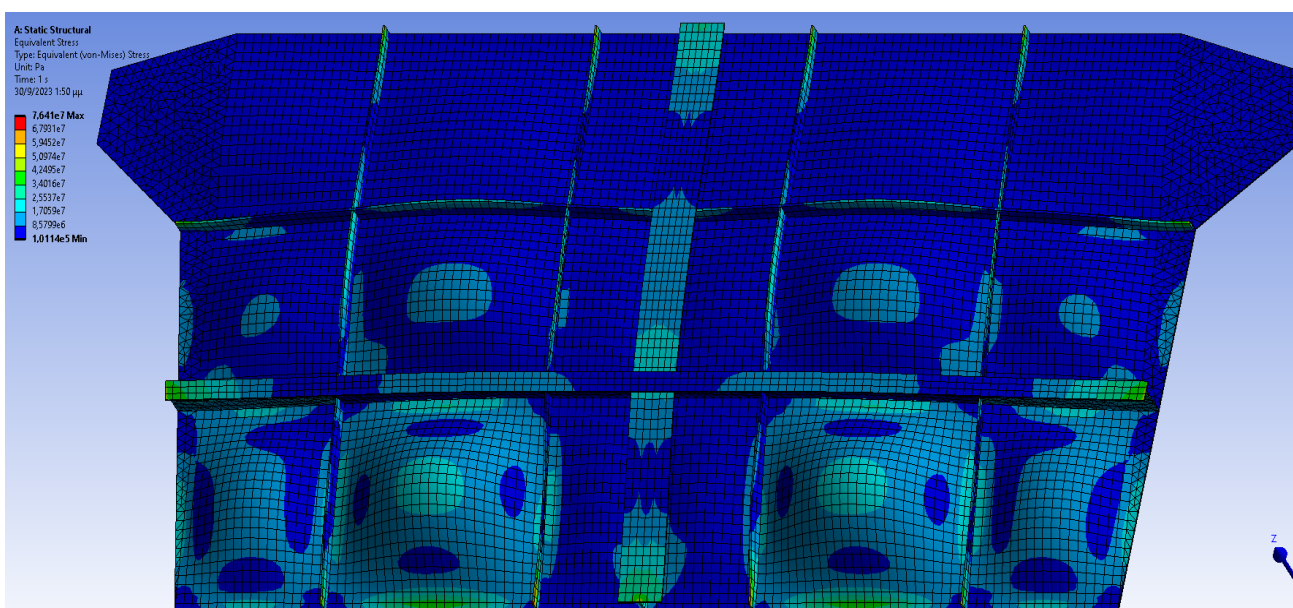
$$w_{A\_max} = 0.858 \text{ mm}$$



Εικόνα 54. Ολική παραμόρφωση (Total deformation).

## Μέγιστη ισοδύναμη τάση Von-Mises

$$\sigma_{A\_max} = 76.4 \text{ N/mm}^2$$

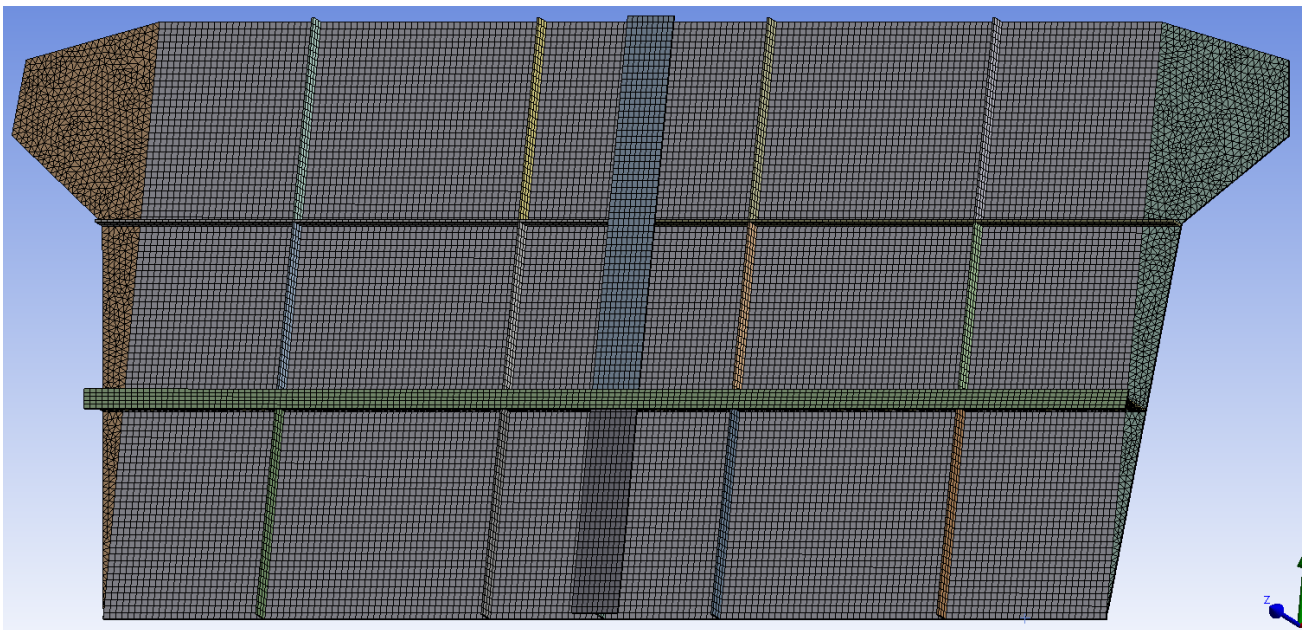


Εικόνα 55. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (Von-Mises stress).

## **B. Ανάλυση μοντέλου από εξαέδρα στοιχεία με μέγεθος πλέγματος 20 mm.**

### **Δημιουργία πλέγματος**

Για την συγκεκριμένη ανάλυση επιλέγουμε στοιχεία πλέγματος με διαστάσεις πλευρών 20 mm, δηλαδή 0.02 m. Άρα, 60 mm ελάχιστο πλάτος και 20 mm πλάτος στοιχείου δίνουν τουλάχιστον 4 κόμβους. Εκτελώντας τις κατάλληλες εντολές στο Mechanical και συγκεκριμένα στο mesh, δημιουργούμε το παρακάτω πλέγμα.

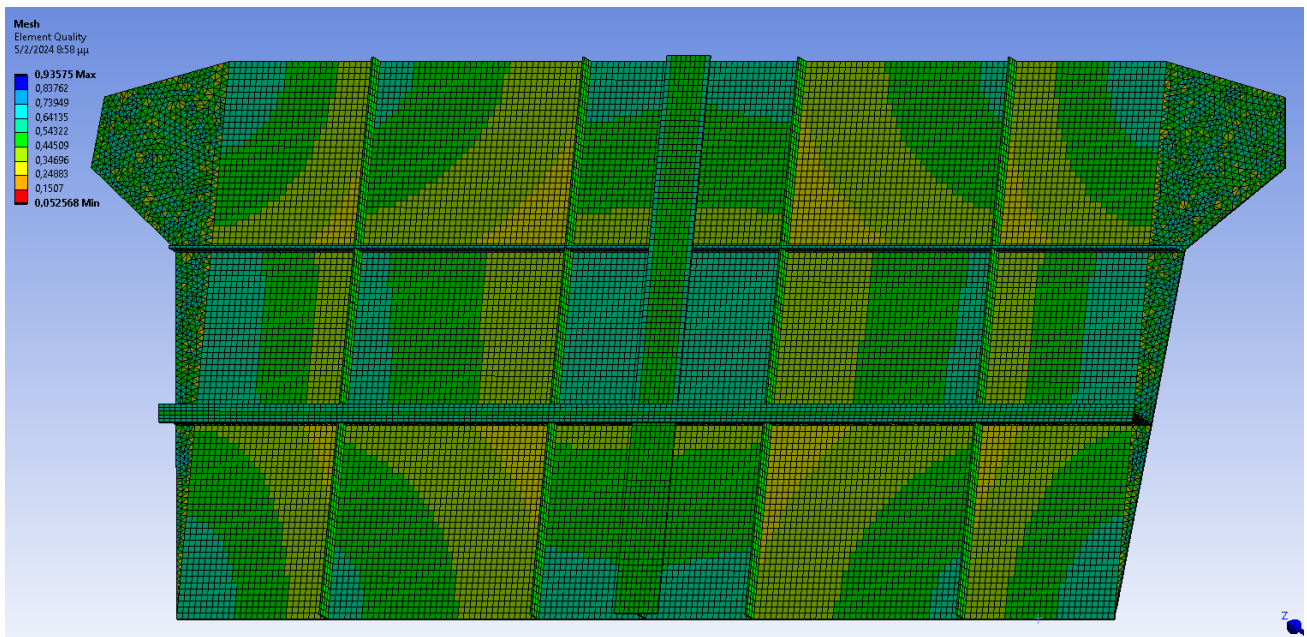


Εικόνα 56. Πλέγμα μοντέλου με εξαεδρικά στοιχεία (mesh).

Τα τετράεδρα στοιχεία έχουν περιοριστεί στο ελάχιστο λόγω της ομαδοποίησης των στοιχείων της φρακτής σε component όπως και στην περίπτωση A. Είναι ένα ικανοποιητικό πλέγμα με την πλειοψηφία των στοιχείων να είναι εξαεδρικά.

### **Έλεγχος πλέγματος**

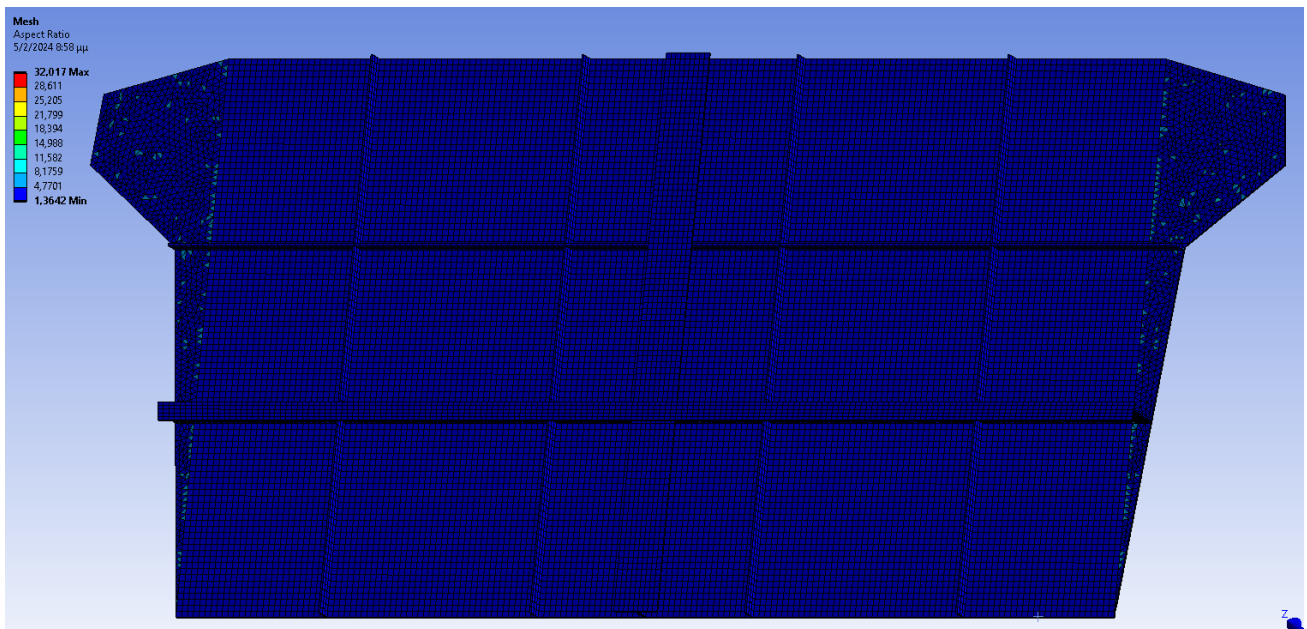
Οι επιλογές ελέγχου ομοίως με την περίπτωση A είναι η ποιότητα του στοιχείου (element quality), η αναλογία των πλευρών του (aspect ratio), η στρεβλότητα (skewness). Και εδώ, πολύ σημαντικός έλεγχος για το πλέγμα είναι η διασφάλιση πως όλοι οι κόμβοι των στοιχείων ταυτίζονται μεταξύ τους. Ο έλεγχος ξεκινά με την ποιότητα των στοιχείων.



Εικόνα 57. Ποιότητα στοιχείων (element quality).

Η ποιότητα των στοιχείων είναι καλή. Το μέγεθος του πλέγματος εξακολουθεί να μην είναι αρκετά αναλυτικό σε σχέση με το μέγεθος του μοντέλου. Για καλύτερη ποιότητα θα πρέπει τα στοιχεία να μικρύνουν και να προσδώσουν μεγαλύτερη ακρίβεια.

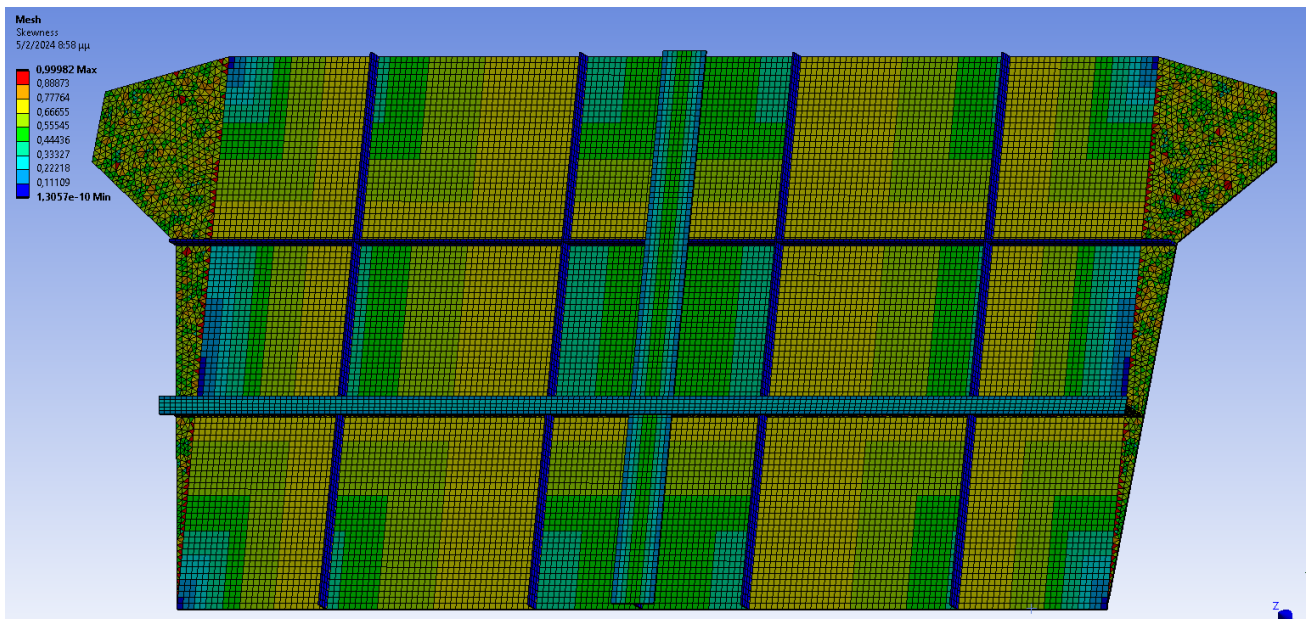
Ο έλεγχος συνεχίζεται με την αναλογία των πλευρών των στοιχείων.



Εικόνα 58. Αναλογίες πλευρών στοιχείων (aspect ratio).

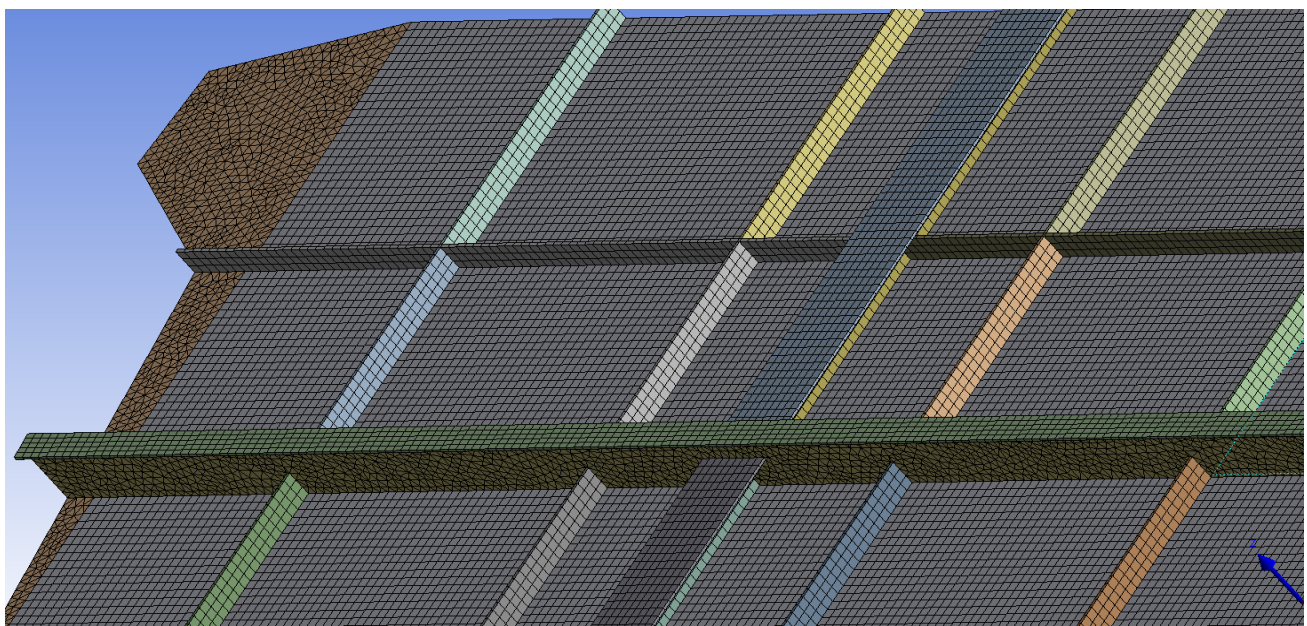
Οι αναλογίες των στοιχείων των πλευρών είναι εξαιρετικές διότι το μοντέλο αποτελείται στην πλειοψηφία του από εξάεδρα στοιχεία. Επόμενος έλεγχος είναι η στρεβλότητα των στοιχείων.





Εικόνα 59. Στρεβλότητα στοιχείων (skewness).

Τα αποτελέσματα της στρεβλότητας των στοιχείων δεν είναι ικανοποιητικά. Έπειτα, πραγματοποιείται ομοίως ο έλεγχος για την ταύτιση των κόμβων των στοιχείων σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου (node merging).



Εικόνα 60. Ενώσεις κόμβων στοιχείων (node merging)

Παρατηρούμαι πως όλοι οι κόμβοι των στοιχείων ταυτίζονται. Συνεπώς, το πλέγμα και εδώ πληρεί την βασική προϋπόθεση για να χαρακτηριστεί σωστό.

### **Εισαγωγή δυνάμεων**

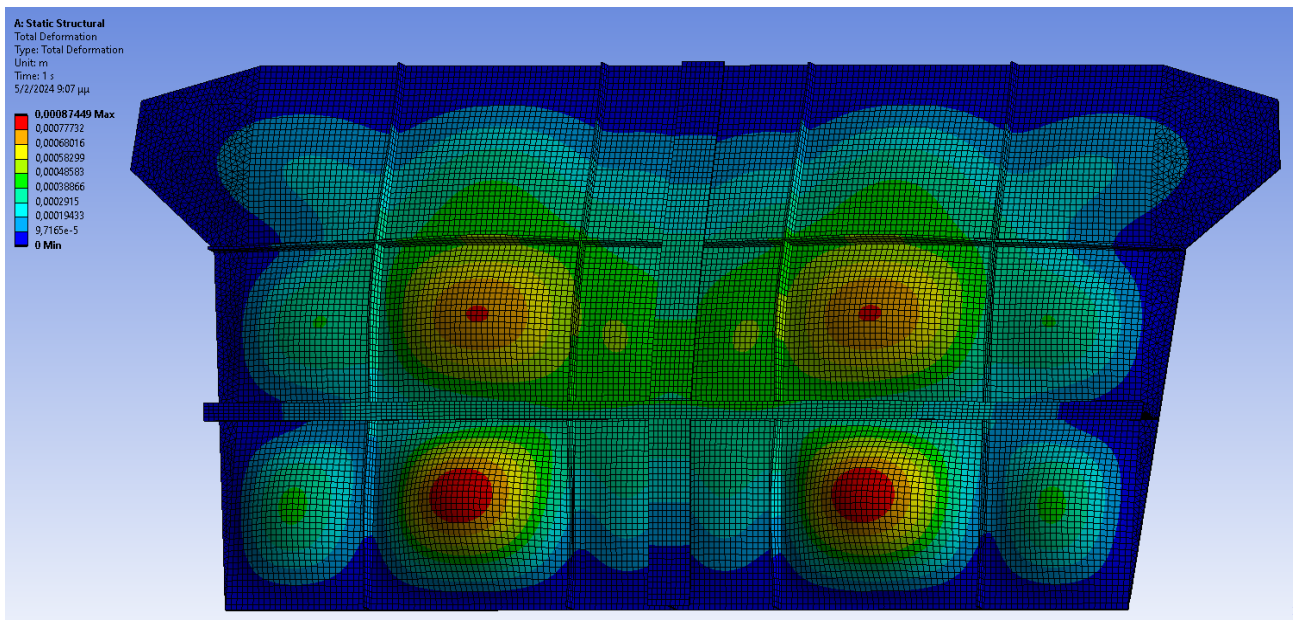
Οι δυνάμεις που θα ασκηθούν στο μοντέλο είναι ίδιες και ο τρόπος εφαρμογής τους παραμένει σταθερός με την περίπτωση Α.

## Επίλυση προβλήματος

Αφού έχουν καταχωρηθεί όλα τα παραπάνω δεδομένα, είμαστε σε θέση να επιλύσουμε το πρόβλημα αντοχής της πρωραίας φρακτής συγκρούσεως. Τα αποτελέσματα που εξάγουμε είναι τα εξής:

**Μέγιστο βέλος κάμψης:**

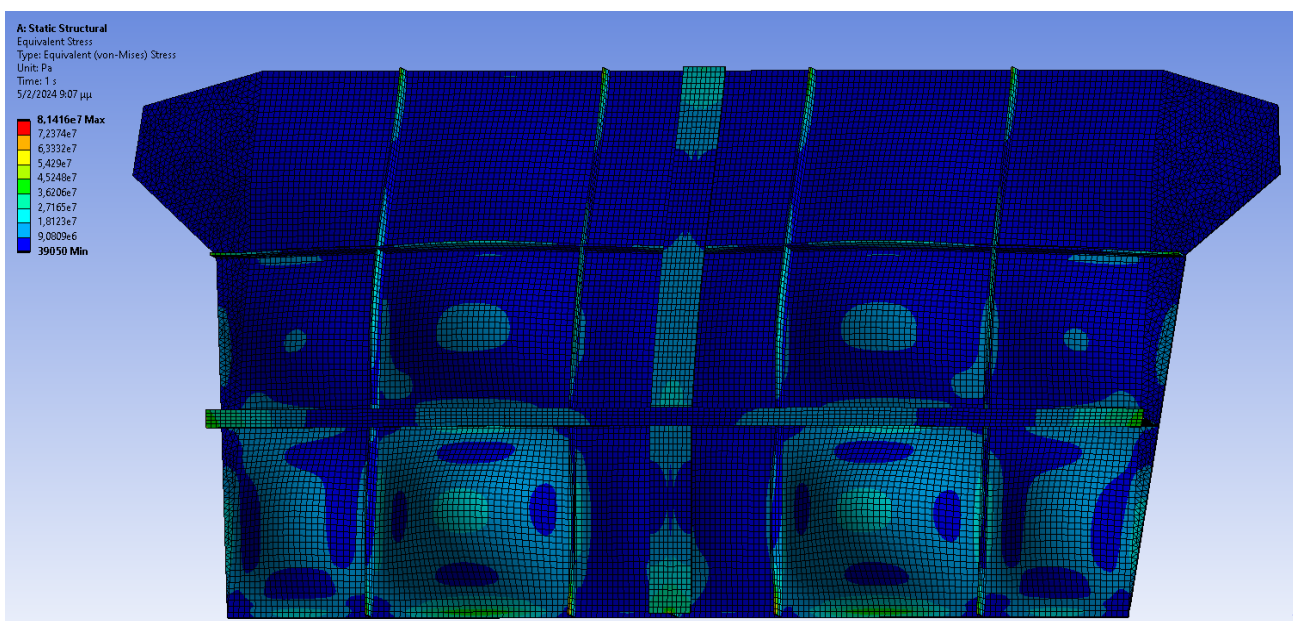
$$w_{B\_max} = 0.875 \text{ mm}$$



Εικόνα 61. Ολική παραμόρφωση (Total deformation).

**Μέγιστη ισοδύναμη τάση Von-Mises:**

$$\sigma_{B\_max} = 81.4 \text{ N/mm}^2$$

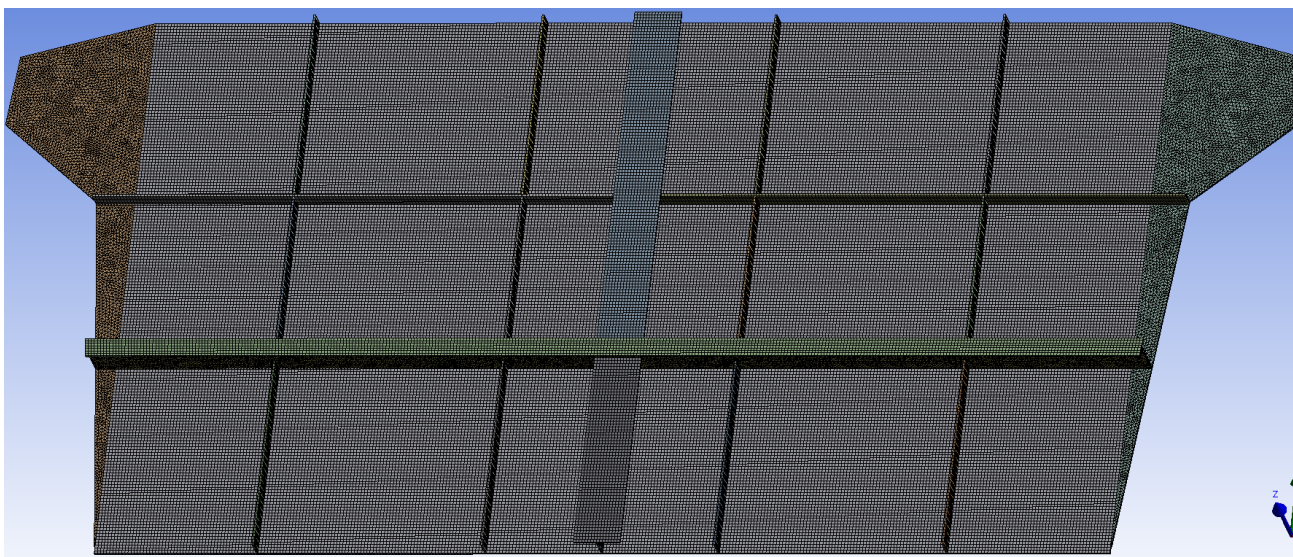


Εικόνα 62. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (Von-Mises stress).

## Γ. Ανάλυση μοντέλου από εξάεδρα στοιχεία με μέγεθος πλέγματος 10 mm.

### Δημιουργία πλέγματος

Για την συγκεκριμένη ανάλυση επιλέγουμε στοιχεία πλέγματος με διαστάσεις πλευρών 10 mm, δηλαδή 0.01 m. Επίσης, και εδώ καλύπτεται η απαίτηση για δύο τουλάχιστον στοιχεία (3 κόμβοι) που να περιγράφουν κάθε ενισχυτικό. Άρα, 60 mm ελάχιστο πλάτος και 10 mm πλάτος στοιχείου δίνουν τουλάχιστον 7 κόμβους. Εκτελώντας τις κατάλληλες εντολές στο Mechanical και συγκεκριμένα στο mesh, δημιουργούμε το παρακάτω πλέγμα.



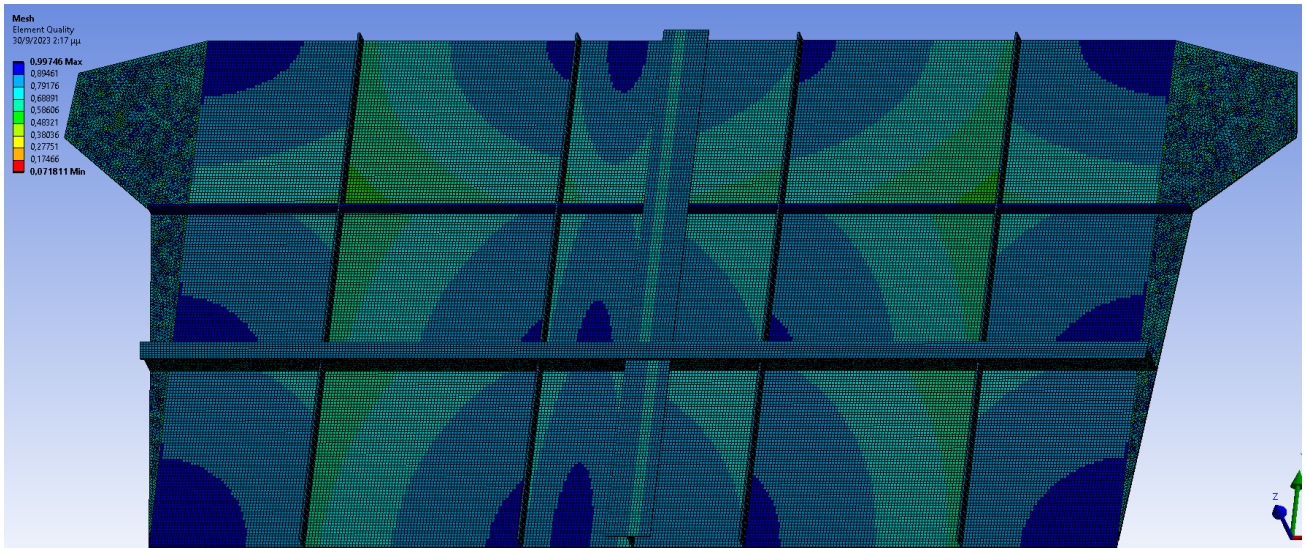
Εικόνα 63. Αναλυτικό πλέγμα μοντέλου με εξαεδρικά στοιχεία (mesh).

Τα τετράεδρα στοιχεία και εδώ έχουν περιοριστεί στο ελάχιστο. Συμπερασματικά, είναι ένα ικανοποιητικό πλέγμα με την πλειοψηφία των στοιχείων να είναι εξαεδρικά και να βρίσκονται στα ίδια σημεία της φρακτής με τις αναλύσεις Α και Β.

### Έλεγχος πλέγματος

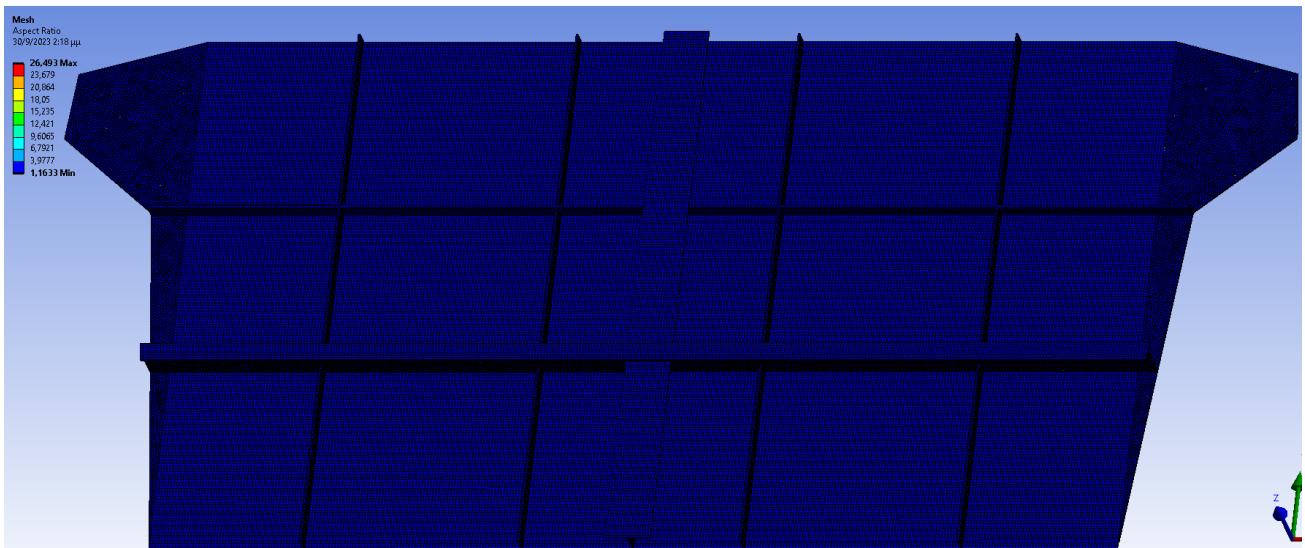
Όπως και προηγουμένως, πραγματοποιούνται οι ίδιοι έλεγχοι ποιότητας του πλέγματος. Ο έλεγχος ξεκινά με την ποιότητα των στοιχείων.





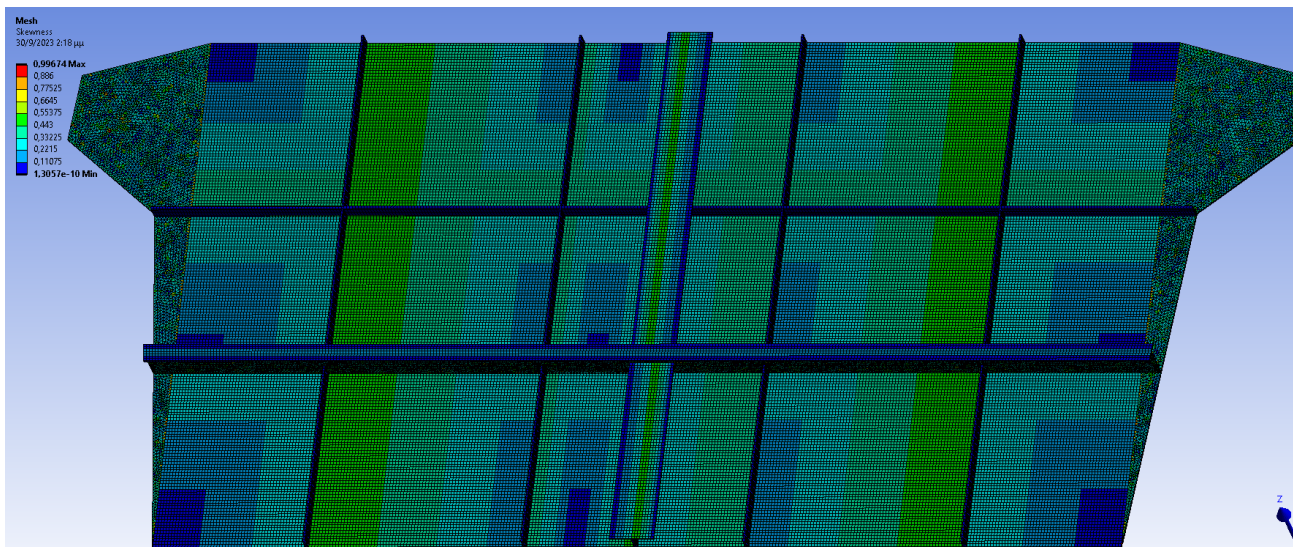
Εικόνα 64. Ποιότητα στοιχείων (element quality).

Η ποιότητα των στοιχείων είναι αρκετά καλή. Οφείλεται στο μέγεθος του πλέγματος που είναι αναλυτικό για το μέγεθος του μοντέλου. Όπως προαναφέρθηκε, γενικότερα ισχύει ο κανόνας πως όσο πιο μικρές είναι οι διαστάσεις των στοιχείων του πλέγματος τόσο καλύτερη είναι και η ποιότητα αυτών. Ο έλεγχος συνεχίζεται με την αναλογία των πλευρών των στοιχείων.



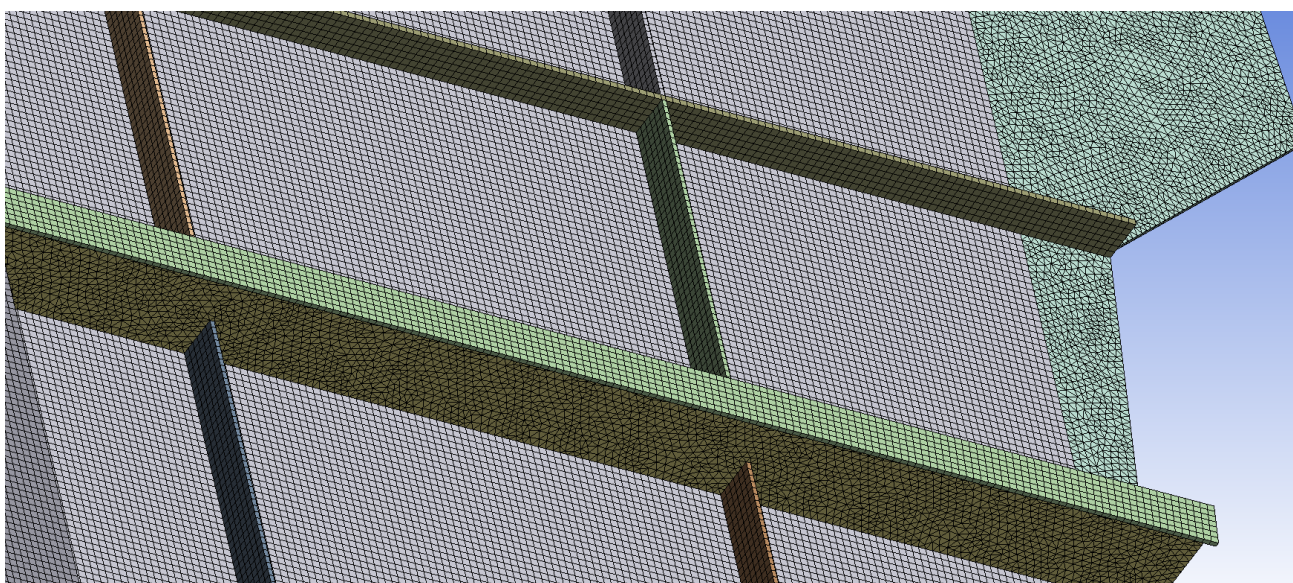
Εικόνα 65. Αναλογίες πλευρών στοιχείων (aspect ratio).

Οι αναλογίες των στοιχείων των πλευρών και εδώ είναι εξαιρετικές διότι οι διαστάσεις των πλευρών των στοιχείων είναι πολύ μικρές. Ο έλεγχος συνεχίζεται για την στρεβλότητα των στοιχείων.



Εικόνα 66. Στρεβλότητα στοιχείων (skewness).

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εξαιρετικά σε σύγκριση με την στρεβλότητα των στοιχείων του μοντέλου με μεγαλύτερο μέγεθος στοιχείων πλέγματος. Τέλος, πραγματοποιείται έλεγχος για την ταύτιση των κόμβων των στοιχείων σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου (node merging).



Εικόνα 67. Ενώσεις κόμβων στοιχείων (node merging).

Παρατηρούμε πως όλοι οι κόμβοι των στοιχείων ταυτίζονται. Συνεπώς, το πλέγμα πληρεί και εδώ την βασική προϋπόθεση για να είναι αποδεκτό.



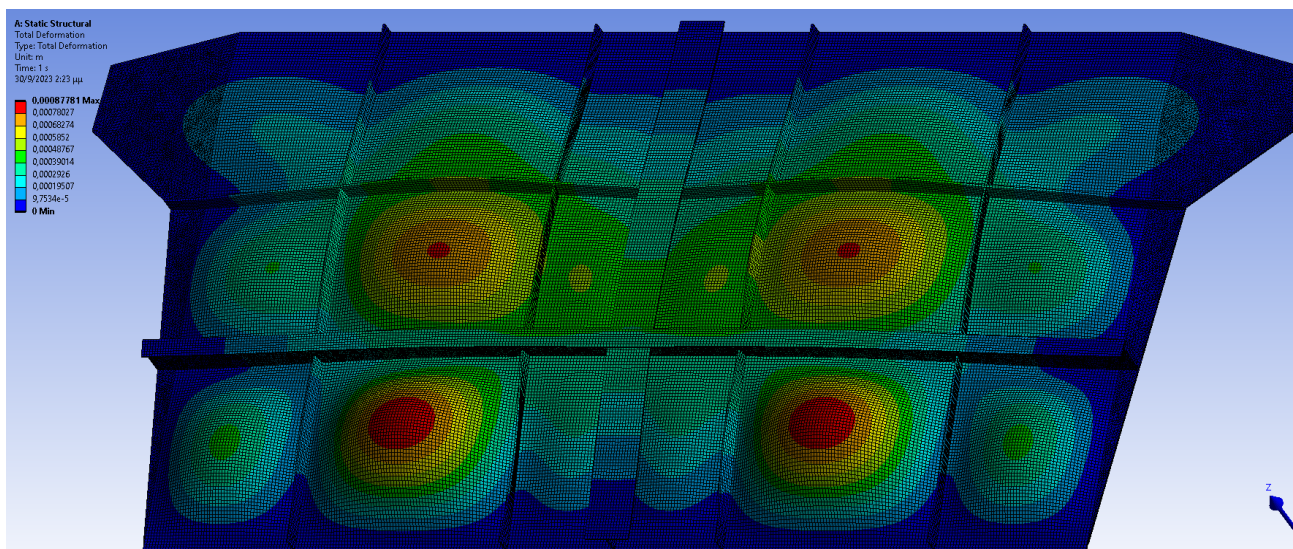
## Εισαγωγή δυνάμεων

Οι δυνάμεις που θα ασκηθούν στο μοντέλο είναι οι ίδιες όπως και στις αναλύσεις Α και Β.

## Επίλυση προβλήματος

### Μέγιστο βέλος κάμψης

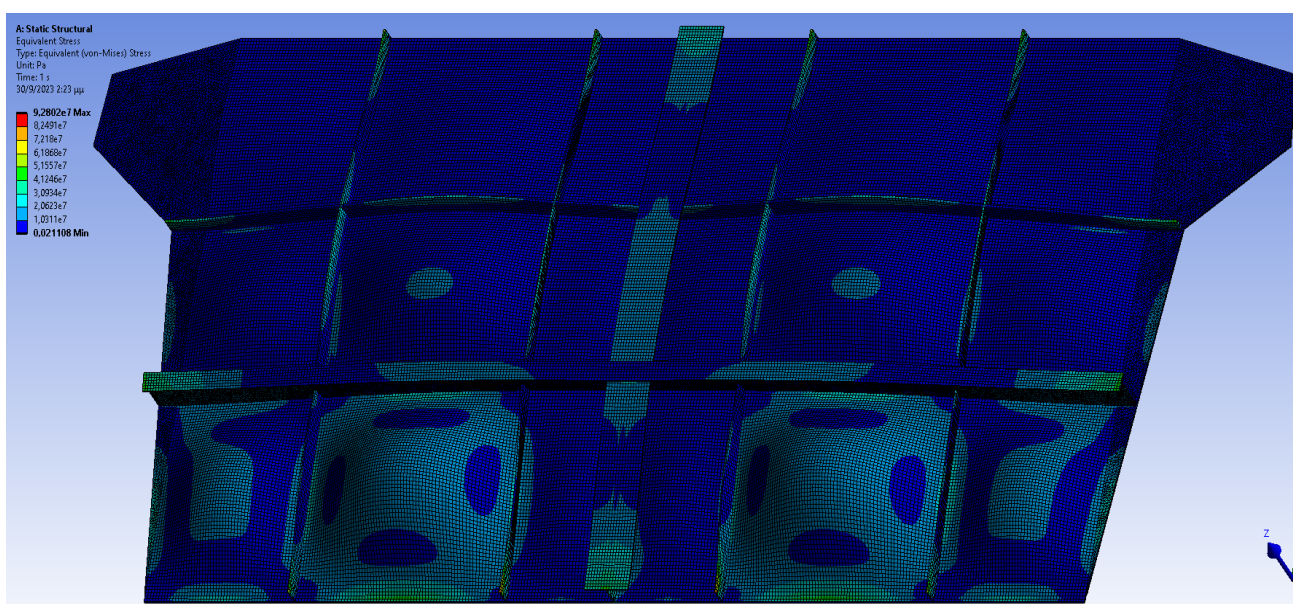
$$w_{\Gamma_{\max}} = 0.878 \text{ mm}$$



Εικόνα 68. Ολική παραμόρφωση (Total deformation).

### Μέγιστη ισοδύναμη τάση Von-Mises

$$\sigma_{\Gamma_{\max}} = 92.8 \text{ N/mm}^2$$

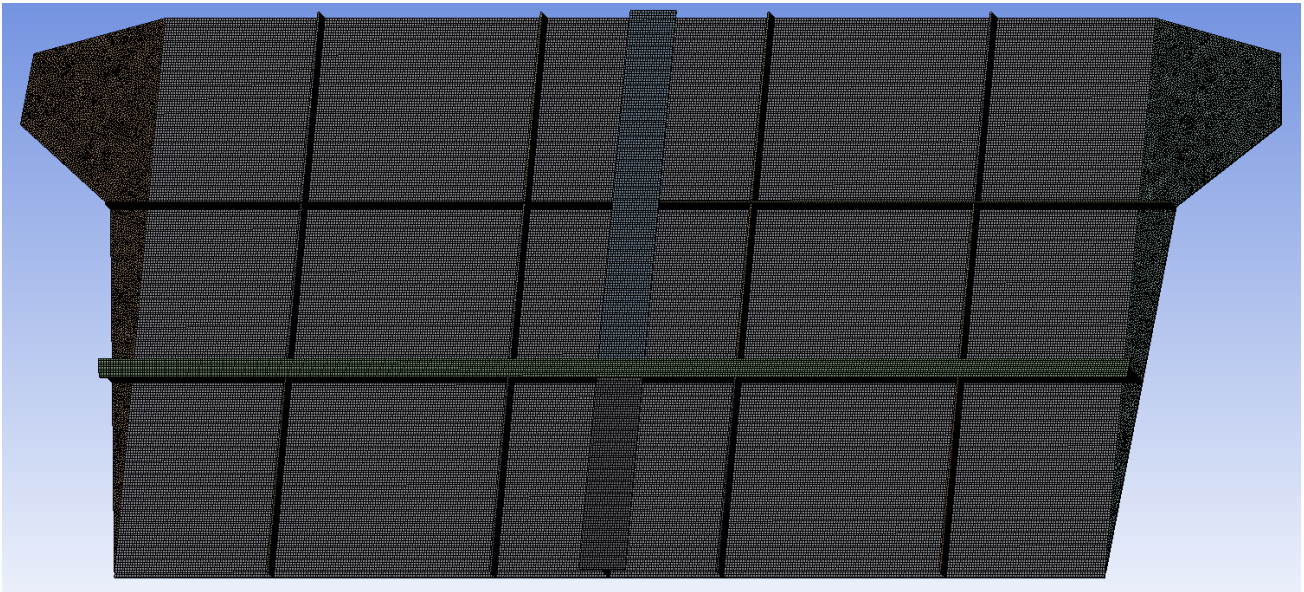


Εικόνα 69. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (Von-Mises stress).

## **Δ. Ανάλυση μοντέλου από εξάεδρα στοιχεία με μέγεθος πλέγματος 8 mm.**

### **Δημιουργία πλέγματος**

Για την ανάλυση αυτή επιλέγουμε στοιχεία πλέγματος με διαστάσεις πλευρών 8 mm, δηλαδή 0.008 m. Επίσης, και εδώ καλύπτεται η απαίτηση για δύο τουλάχιστον στοιχεία (3 κόμβοι) που να περιγράφουν κάθε ενισχυτικό. Άρα, 60 mm ελάχιστο πλάτος και 8 mm πλάτος στοιχείου δίνουν τουλάχιστον 8 κόμβους. Εκτελώντας τις κατάλληλες εντολές στο Mechanical και συγκεκριμένα στο mesh, δημιουργούμε το παρακάτω πλέγμα.



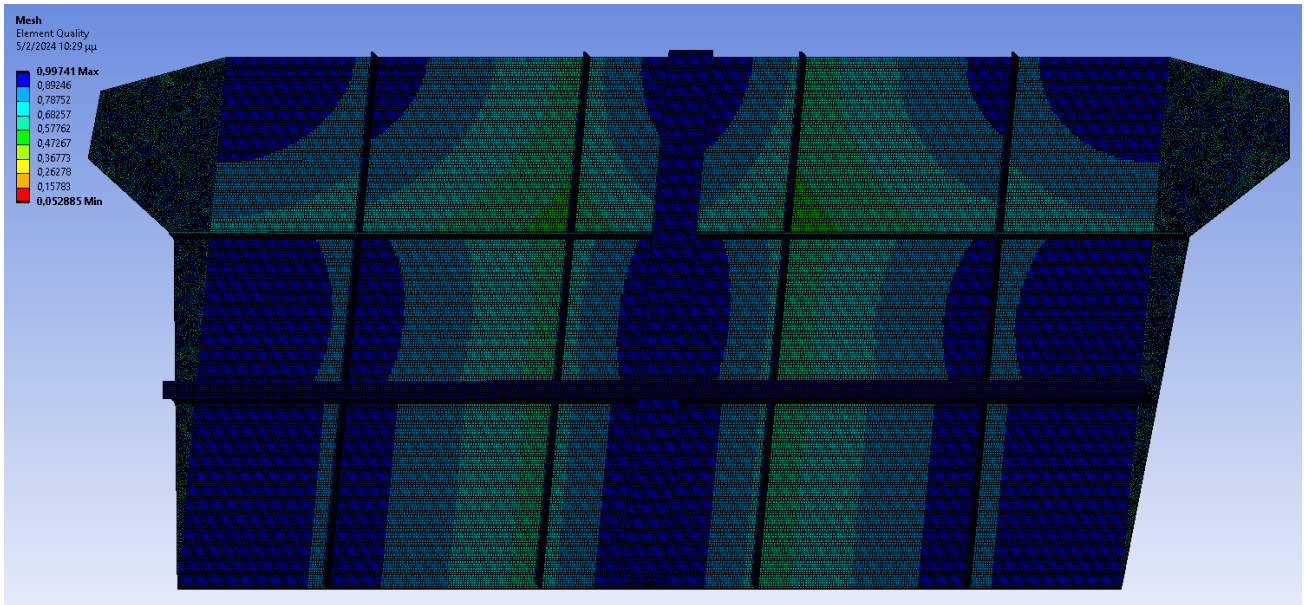
Εικόνα 70. Αναλυτικό πλέγμα μοντέλου με εξαεδρικά στοιχεία (mesh).

Τα τετράεδρα στοιχεία και εδώ έχουν περιοριστεί στο ελάχιστο. Συμπερασματικά, είναι ένα ικανοποιητικό πλέγμα με την πλειοψηφία των στοιχείων να είναι εξαεδρικά και τα τετράεδρα να περιορίζονται στα ίδια σημεία της φρακτής με τις προηγούμενες αναλύσεις.

### **Έλεγχος πλέγματος**

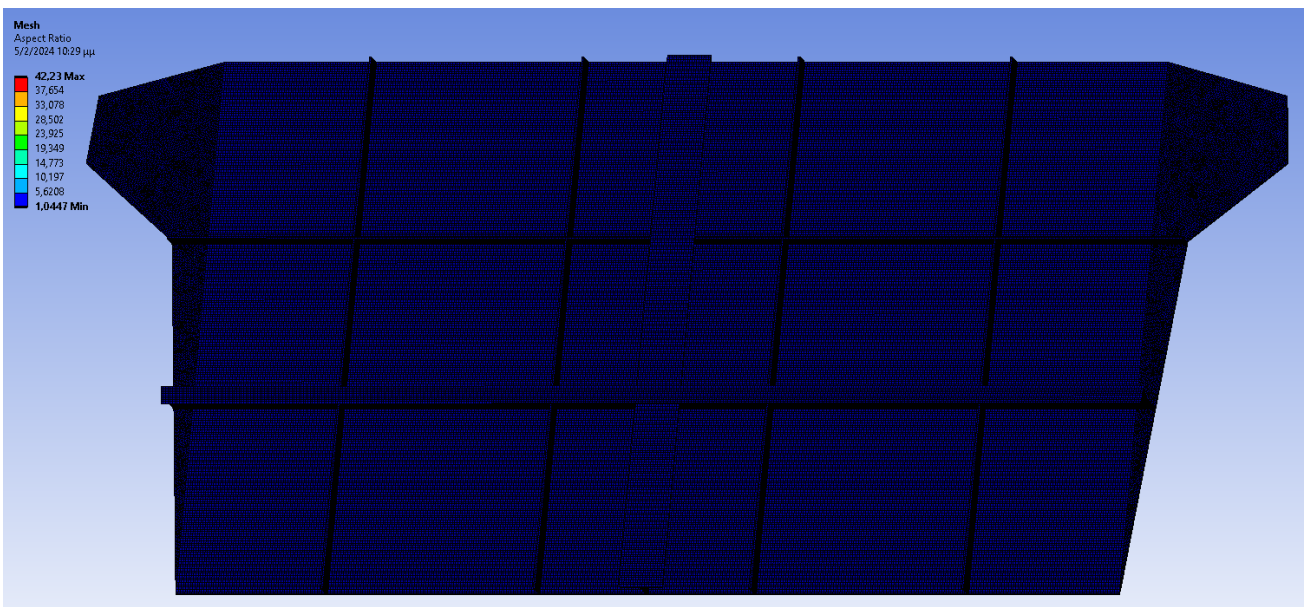
Όπως και προηγουμένως, πραγματοποιούνται οι ίδιοι έλεγχοι ποιότητας του πλέγματος. Ο έλεγχος ξεκινά με την ποιότητα των στοιχείων.





Εικόνα 71. Ποιότητα στοιχείων (element quality).

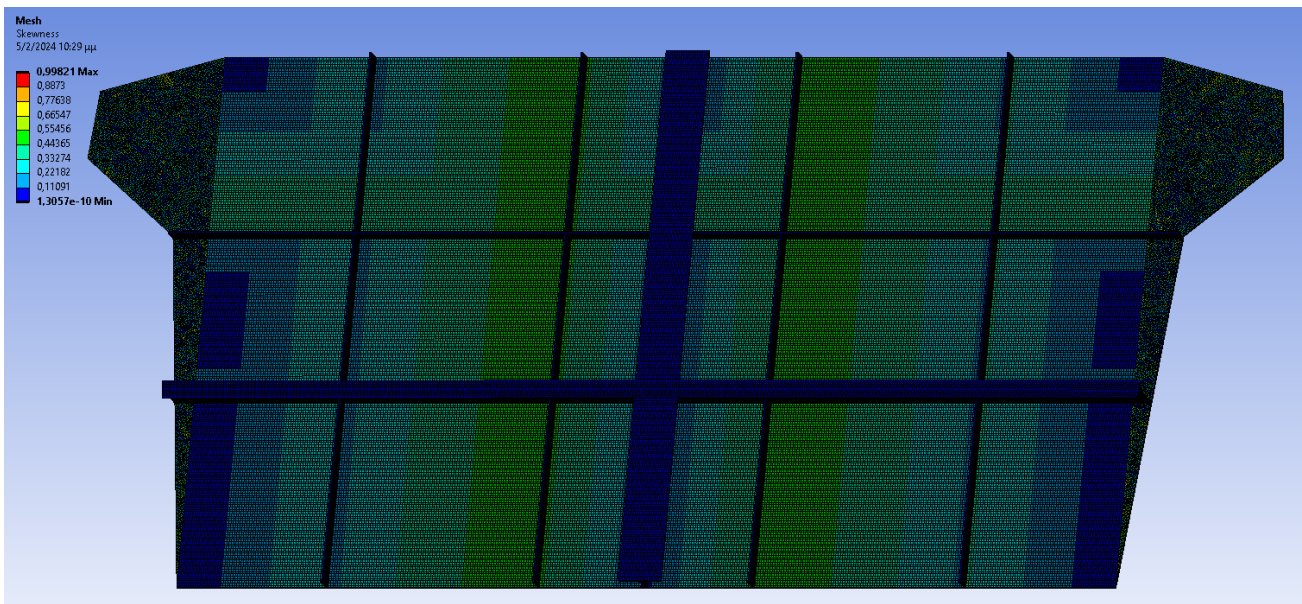
Η ποιότητα των στοιχείων είναι πολύ καλή και αυτό οφείλεται στο μέγεθος του πλέγματος που είναι πολύ αναλυτικό για το μέγεθος του μοντέλου. Ο έλεγχος συνεχίζεται με την αναλογία των πλευρών των στοιχείων.



Εικόνα 72. Αναλογίες πλευρών στοιχείων (aspect ratio).

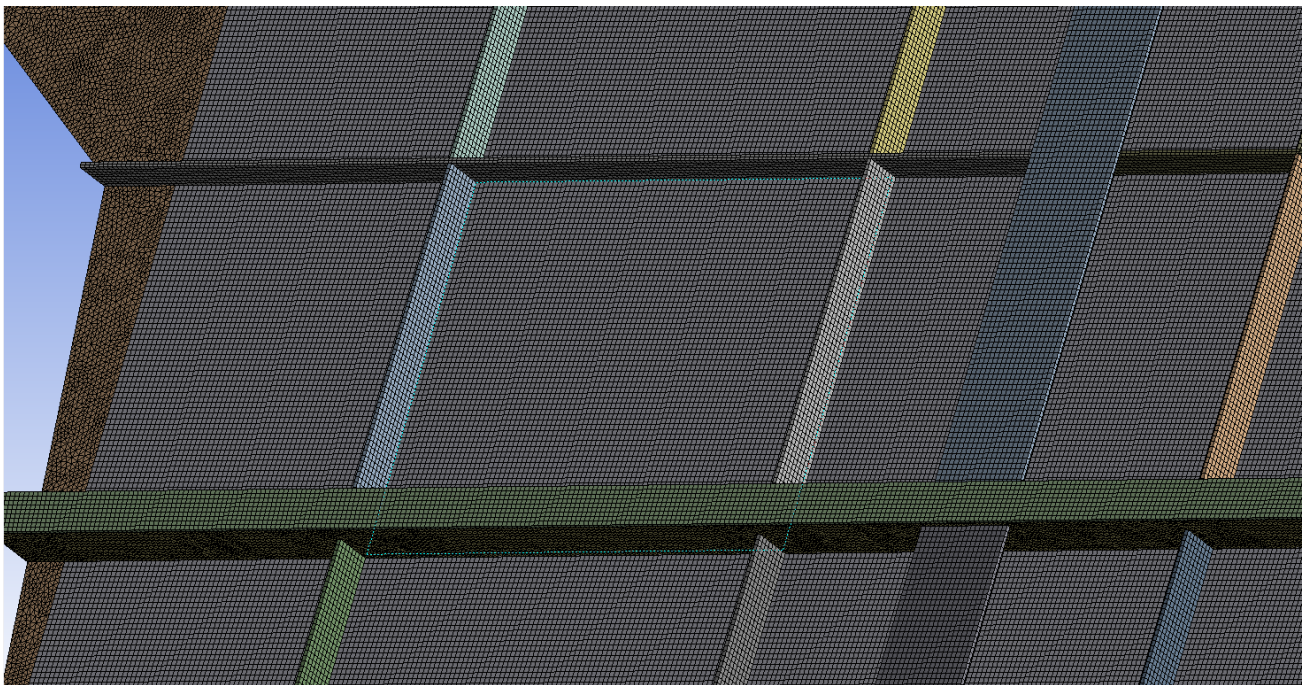
Οι αναλογίες των στοιχείων των πλευρών είναι εξαιρετικές διότι οι διαστάσεις των πλευρών των στοιχείων είναι πολύ μικρές. Ο έλεγχος συνεχίζεται για την στρεβλότητα των στοιχείων.





Εικόνα 73. Στρεβλότητα στοιχείων (skewness).

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εξαιρετικά σε σύγκριση με την στρεβλότητα του μοντέλου με μεγαλύτερο μέγεθος στοιχείων πλέγματος. Τέλος, πραγματοποιείται έλεγχος για την ταύτιση των κόμβων των στοιχείων σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου (node merging).



Εικόνα 74. Ενώσεις κόμβων στοιχείων (node merging).

Παρατηρούμε πως όλοι οι κόμβοι των στοιχείων και σε αυτήν την περίπτωση ταυτίζονται. Συνεπώς, το πλέγμα πληρεί και εδώ την βασική προϋπόθεση για να είναι αποδεκτό.

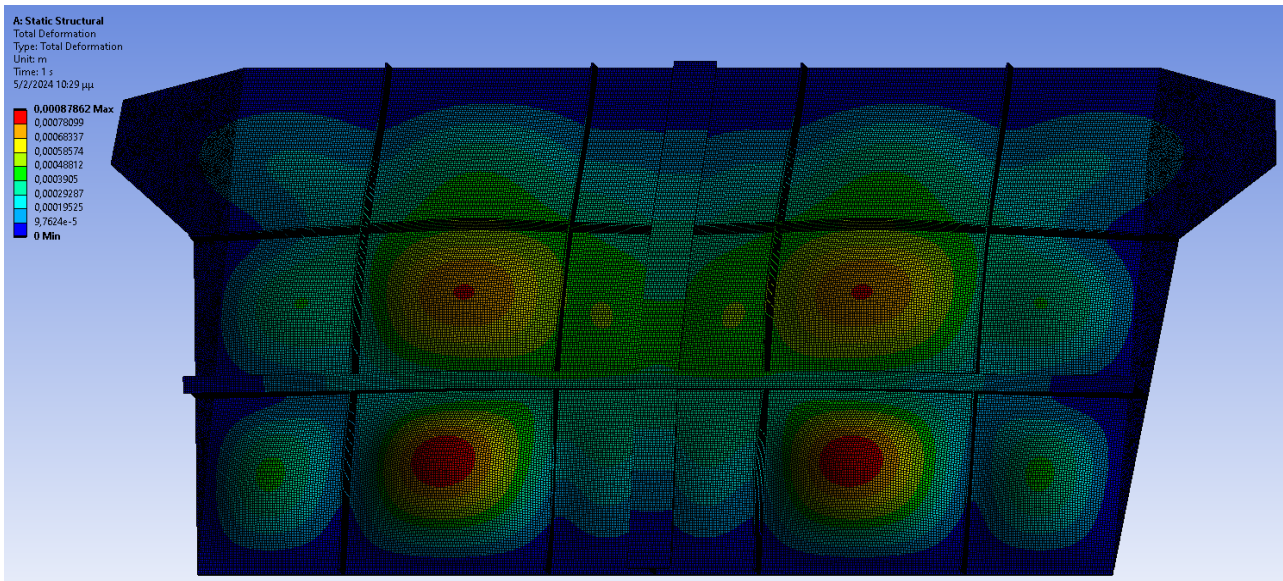
## Εισαγωγή δυνάμεων

Οι δυνάμεις που θα ασκηθούν στο μοντέλο είναι οι ίδιες με όλες τις προηγούμενες αναλύσεις.

## Επίλυση προβλήματος

### Μέγιστο βέλος κάμψης

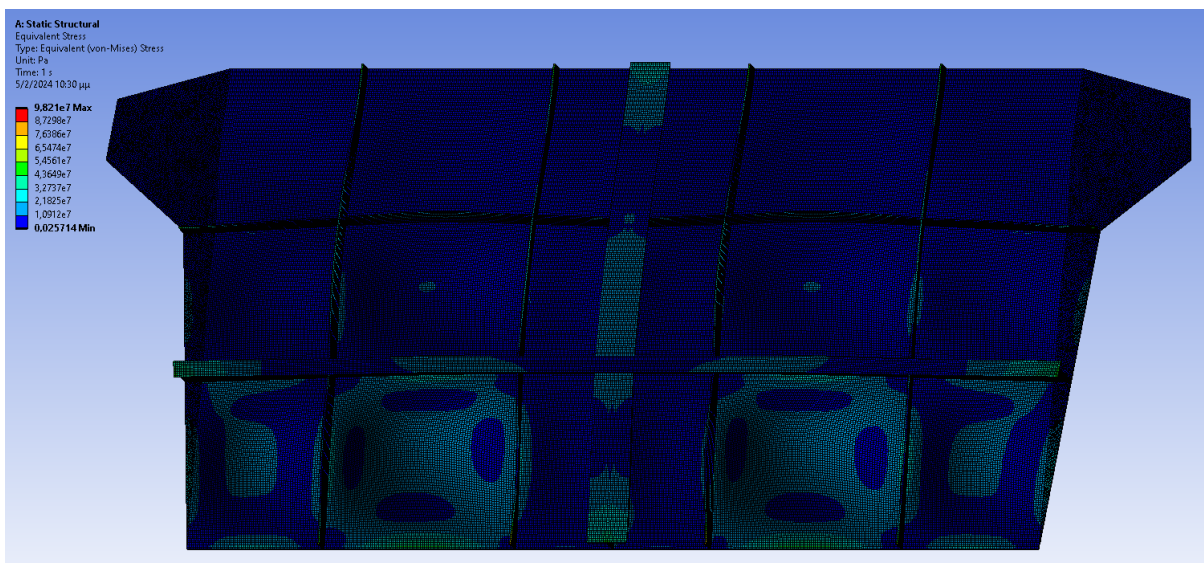
$$w_{\Delta\_max} = 0.879 \text{ mm}$$



Εικόνα 75. Ολική παραμόρφωση (Total deformation).

### Μέγιστη ισοδύναμη τάση Von-Mises

$$\sigma_{\Delta\_max} = 98.2 \text{ N/mm}^2$$



Εικόνα 76. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (Von-Mises stress).

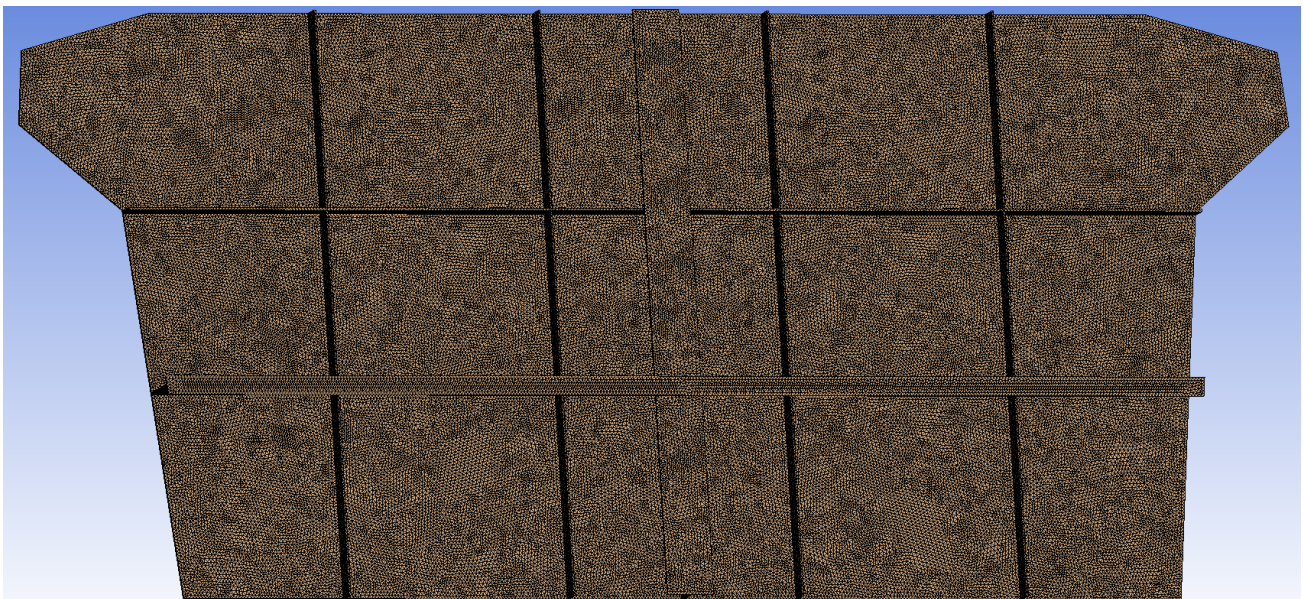


## **Ε. Ανάλυση μοντέλου από τετράεδρα στοιχεία με μέγεθος πλέγματος 8 mm.**

Η συγκεκριμένη προσέγγιση θα προσδώσει μεγάλο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον όσον αφορά την σύγκριση των αποτελεσμάτων με την επίλυση Δ. Θα αναλυθεί η ακρίβεια του πλέγματος και κατά πόσον τα τετραεδρικά στοιχεία δίνουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Για τις ανάγκες δημιουργίας του πλέγματος χρειάστηκε να εκτελεστεί η εντολή Combine στο Spaceclaim, επιλέγοντας ταυτόχρονα όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία της φρακτής. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα ενιαίο σώμα.

### **Δημιουργία πλέγματος**

Η ανάλυση με τετράεδρα στοιχεία πλέγματος θα έχει ίδιες διαστάσεις πλευρών στοιχείων 10 mm. Διατηρώντας το ίδιο μέγεθος πλέγματος με την προσέγγιση Β, θα μπορεί να γίνει ασφαλής σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο προσεγγίσεων. Μετά από κατάλληλη διεργασία δημιουργείται το παρακάτω πλέγμα



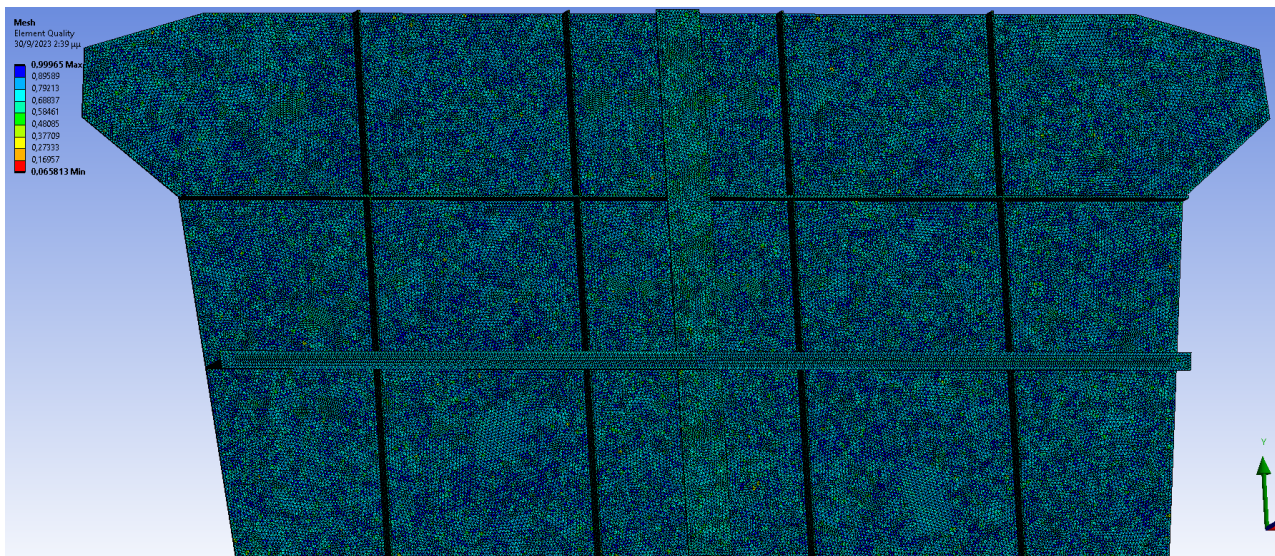
Εικόνα 77. Αναλυτικό πλέγμα μοντέλου με τετραεδρικά στοιχεία (mesh).

Παρατηρούμαι πως όλο το πλέγμα της φρακτής αποτελείται από τετραεδρικά στοιχεία. Σύμφωνα με του κανονισμούς του ABS αυτό κανονικά θα έπρεπε να αποφευχθεί, αλλά για ακαδημαϊκούς λόγους προχωράμε στην επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Γενικότερα, η γεωμετρία του πλέγματος δεν είναι καθόλου ικανοποιητική.

### **Έλεγχος πλέγματος**

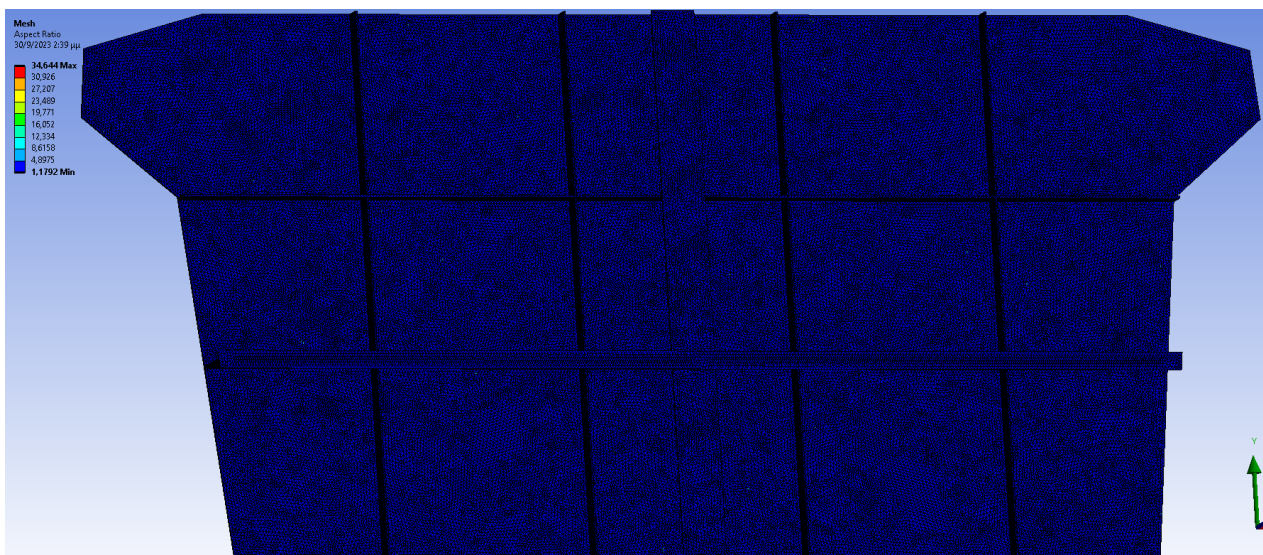
Παρά τα τετράεδρα στοιχεία, το ANSYS εμφανίζει τα παρακάτω αποτελέσματα όσον αφορά την ποιότητα του πλέγματος.





Εικόνα 78. Ποιότητα στοιχείων (element quality).

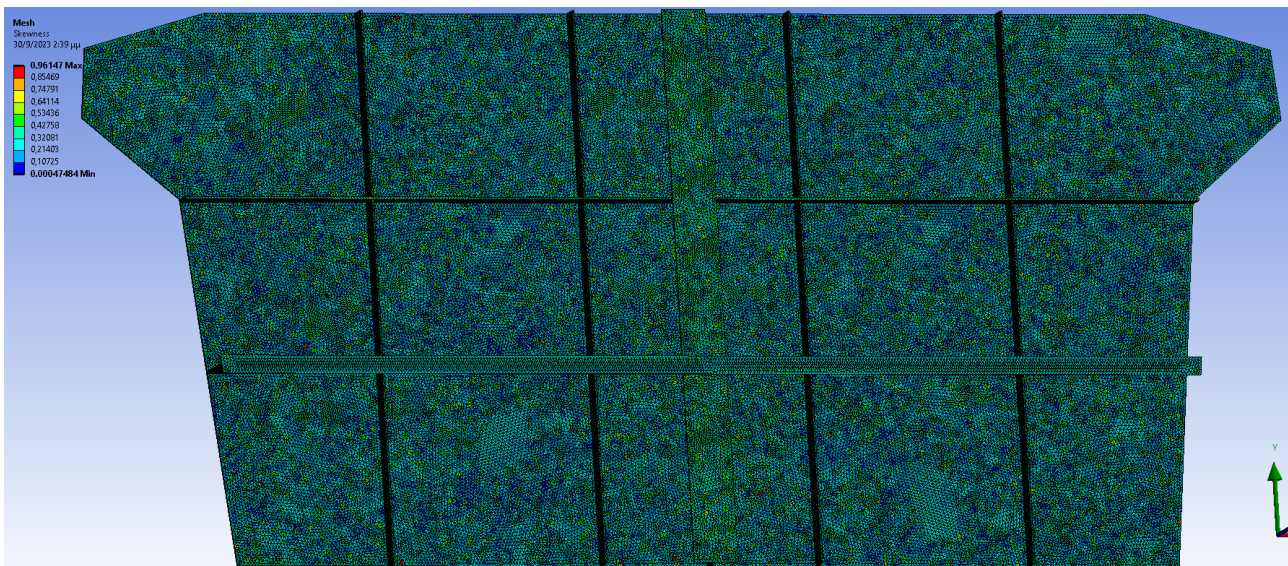
Η ποιότητα των στοιχείων είναι σχετικά καλή με μερικά μεμονωμένα κακής ποιότητας στοιχεία καθ'όλη την επιφάνεια του μοντέλου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως το μέγεθος του πλέγματος είναι πολύ αναλυτικό σε σχέση με το μέγεθος του μοντέλου. Όσον αφορά τον έλεγχο για την αναλογία των πλευρών των στοιχείων, δίνονται τα παρακάτω αποτελέσματα.



Εικόνα 79. Αναλογίες πλευρών στοιχείων (aspect ratio).

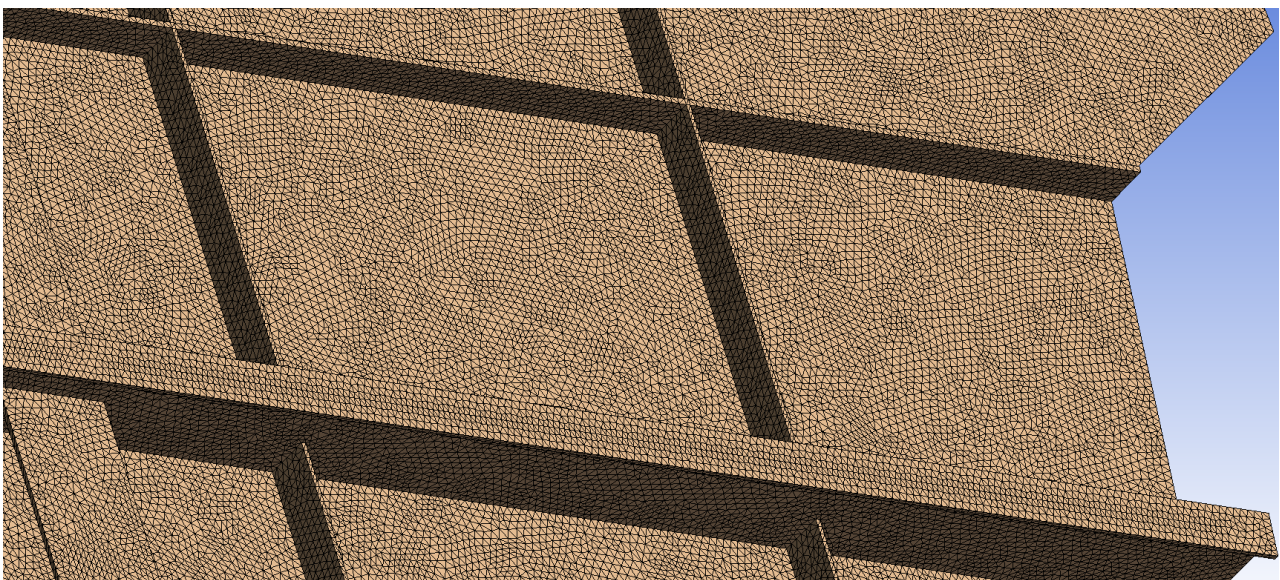
Οι αναλογίες των στοιχείων των πλευρών είναι εξαιρετικές. Αυτό σημαίνει πως τα τρίγωνα που εμφανίζονται στην επιφάνεια είναι στην πλειοψηφία τους ισόπλευρα. Ο έλεγχος συνεχίζεται για την στρεβλότητα των στοιχείων.





Εικόνα 80. Στρεβλότητα στοιχείων (skewness).

Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι μέτρια σε σύγκριση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Αυτό είναι λογικό διότι τα εξαεδρικά στοιχεία είναι καλύτερης ποιότητας από τα τετραεδρικά. Τέλος, πραγματοποιείται και εδώ ο έλεγχος για την ταύτιση των κόμβων των στοιχείων σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου (node merging). Από την στιγμή που το ANSYS διαβάζει ένα ενιαίο σώμα είναι αναμενόμενο και οι κόμβοι των στοιχείων να ταυτίζονται.



Εικόνα 81. Ενώσεις κόμβων στοιχείων (node merging).

## **Εισαγωγή δυνάμεων**

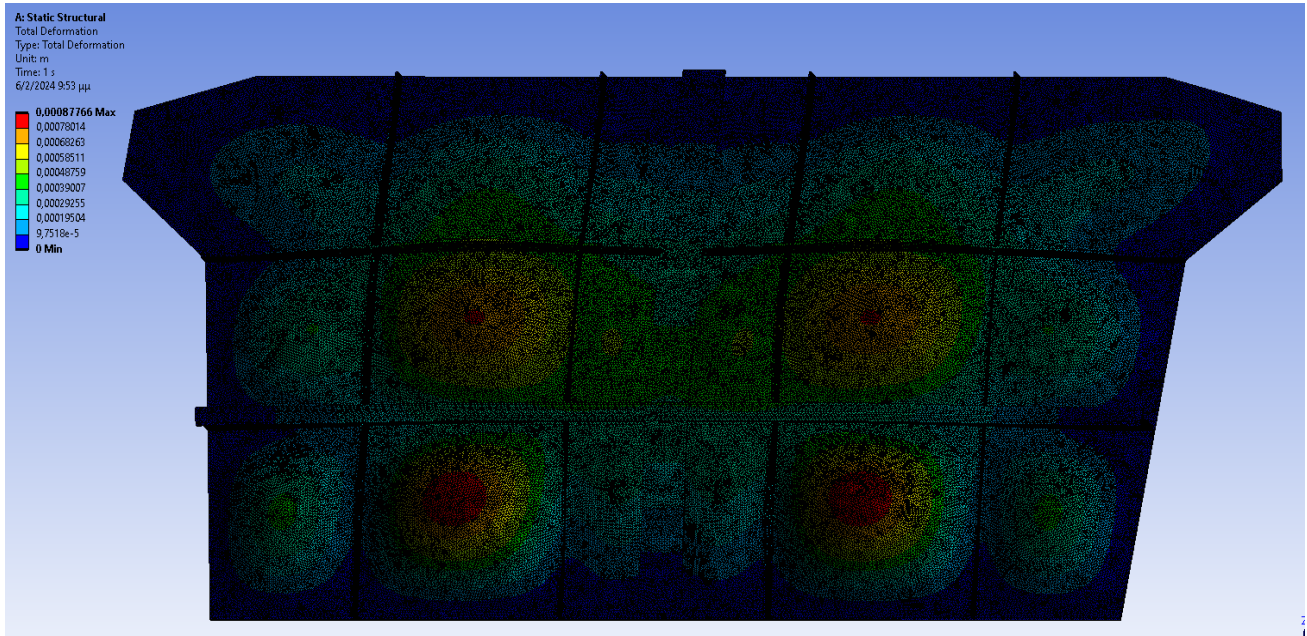
Οι δυνάμεις που θα ασκηθούν στο μοντέλο είναι οι ίδιες με όλες τις προηγούμενες αναλύσεις και με την ίδια μέγιστη τιμή υδροστατικής πίεσης.



## Επίλυση προβλήματος

Μέγιστο βέλος κάμψης.

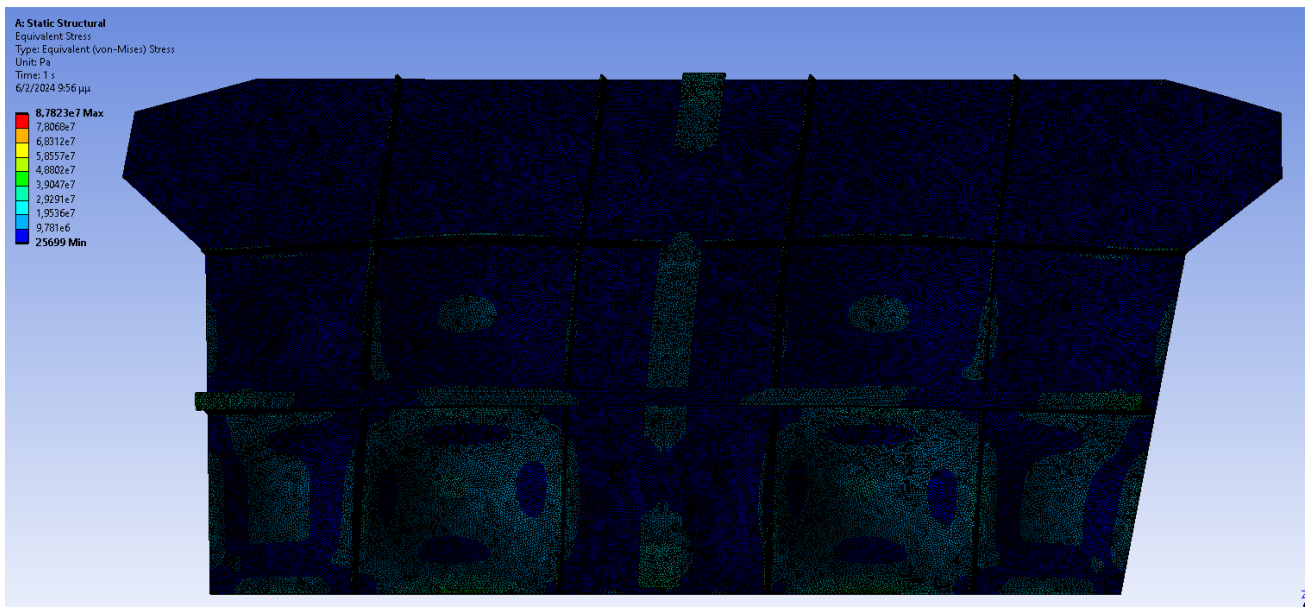
$$w_{E\_max} = 0.878 \text{ mm}$$



Εικόνα 82. Ολική παραμόρφωση (Total deformation).

Μέγιστη ισοδύναμη τάση Von-Mises.

$$\sigma_{E\_max} = 87.8 \text{ N/mm}^2$$



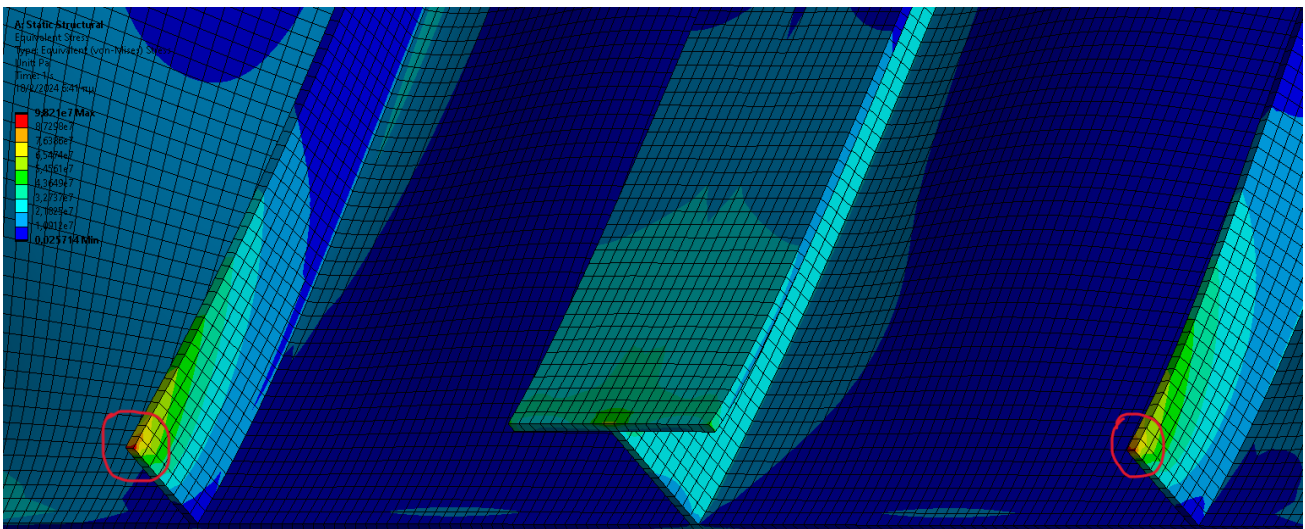
Εικόνα 83. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (Von-Mises stress).

### 4.4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

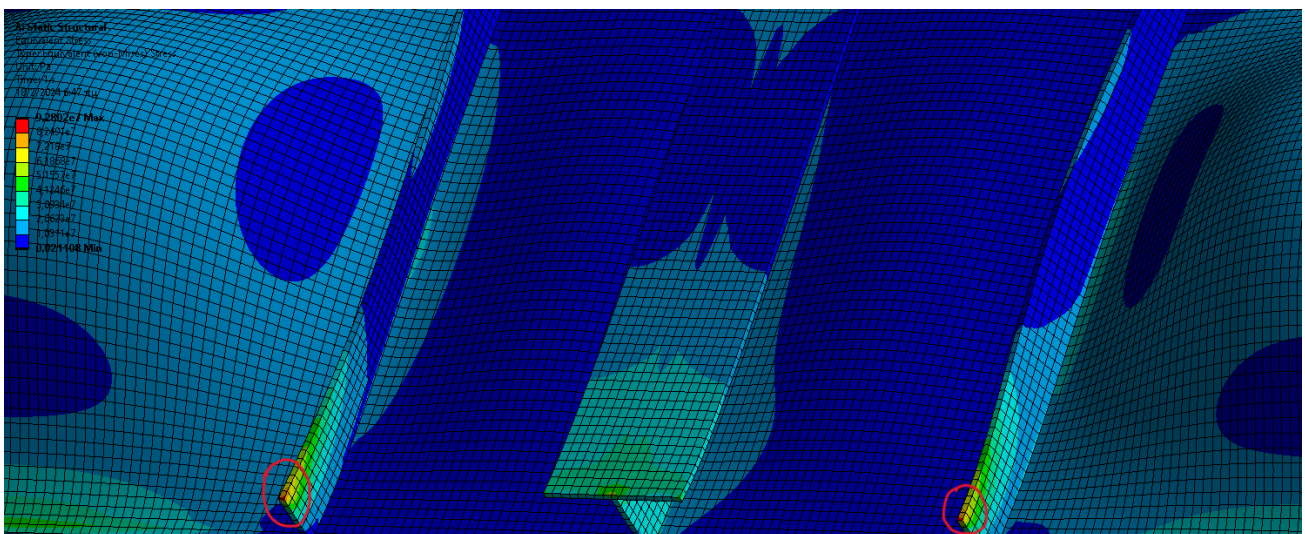
Οι αναλύσεις που προηγήθηκαν παρουσιάζουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

#### A) Τάση Von-Mises και σημεία εμφάνισης μέγιστων τιμών.

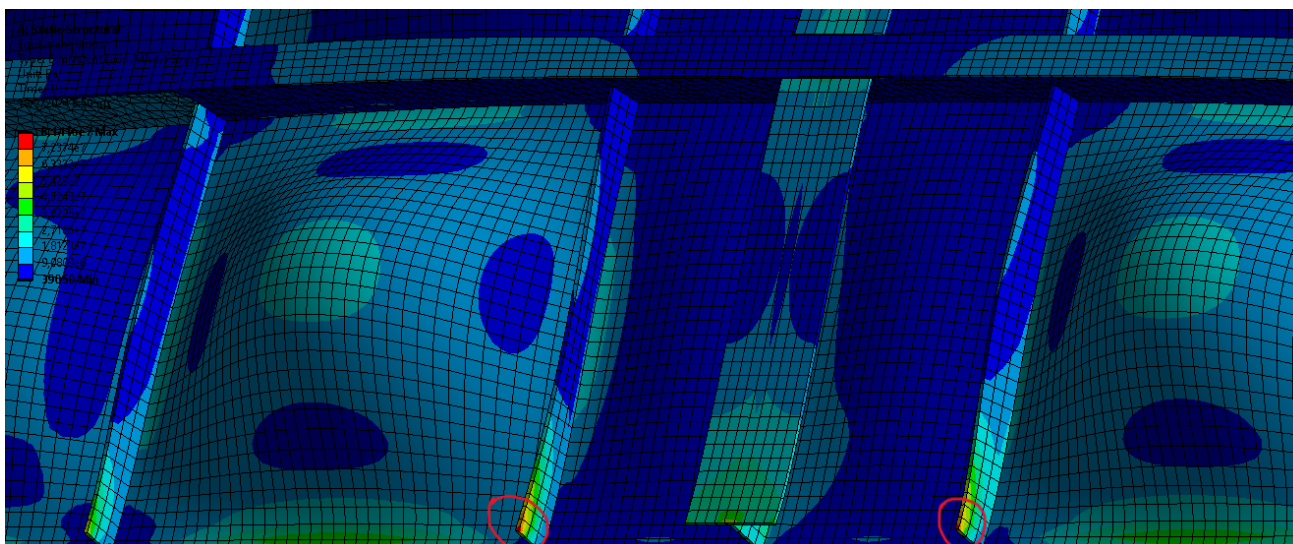
Παρατηρούμε πως σε όλες τις αναλύσεις με εξάεδρα στοιχεία (ισχύει και για τα τετράεδρα στοιχεία), οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τάσεων εμφανίζονται στο κάτω ακριανό σημείο των δύο κάθετων δευτερευόντων ενισχυτικών αριστερά και δεξιά του κεντρικού κάθετου ενισχυτικού. Το παραπάνω συμπέρασμα είναι λογικό διότι η υδροστατική πίεση έχει τριγωνική κατανομή και συνεπώς οι μεγαλύτερες πιέσεις θα ασκούνται στα κάτω σημεία της φρακτής, όπου έχουμε και την μέγιστη πίεση. Ακολουθούν οι σχετικές εικόνες.



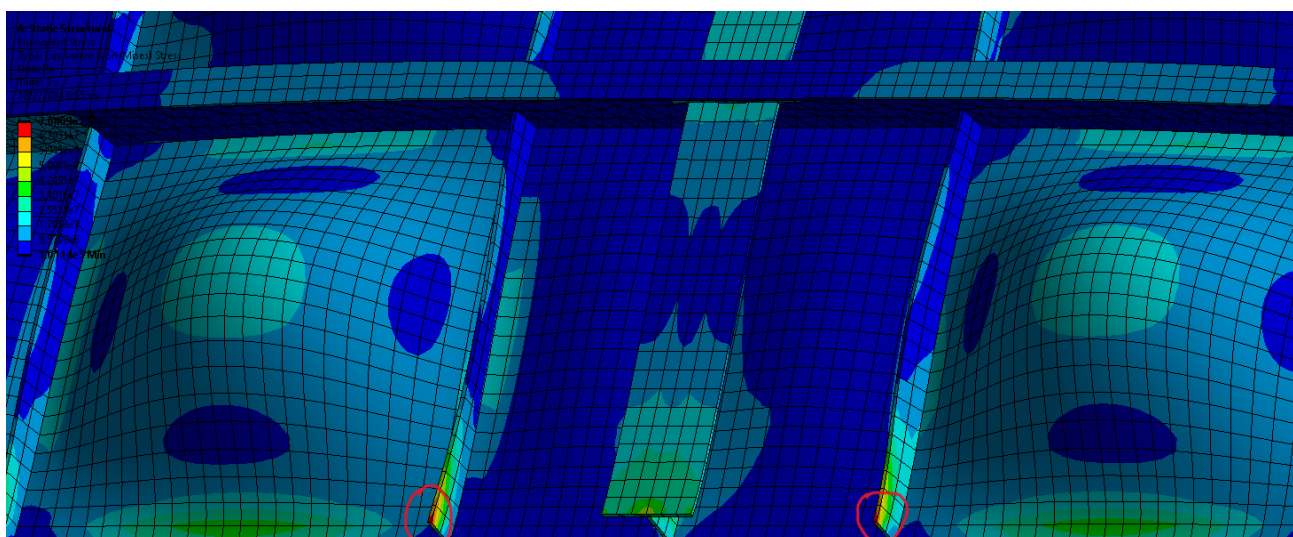
Εικόνα 84. Σημεία εμφάνισης μέγιστης τάσης Von-Mises για πλέγμα 8mm.



Εικόνα 85. Σημεία εμφάνισης μέγιστης τάσης Von-Mises για πλέγμα 10mm.



Εικόνα 86. Σημεία εμφάνισης μέγιστης τάσης Von-Mises για πλέγμα 20mm.

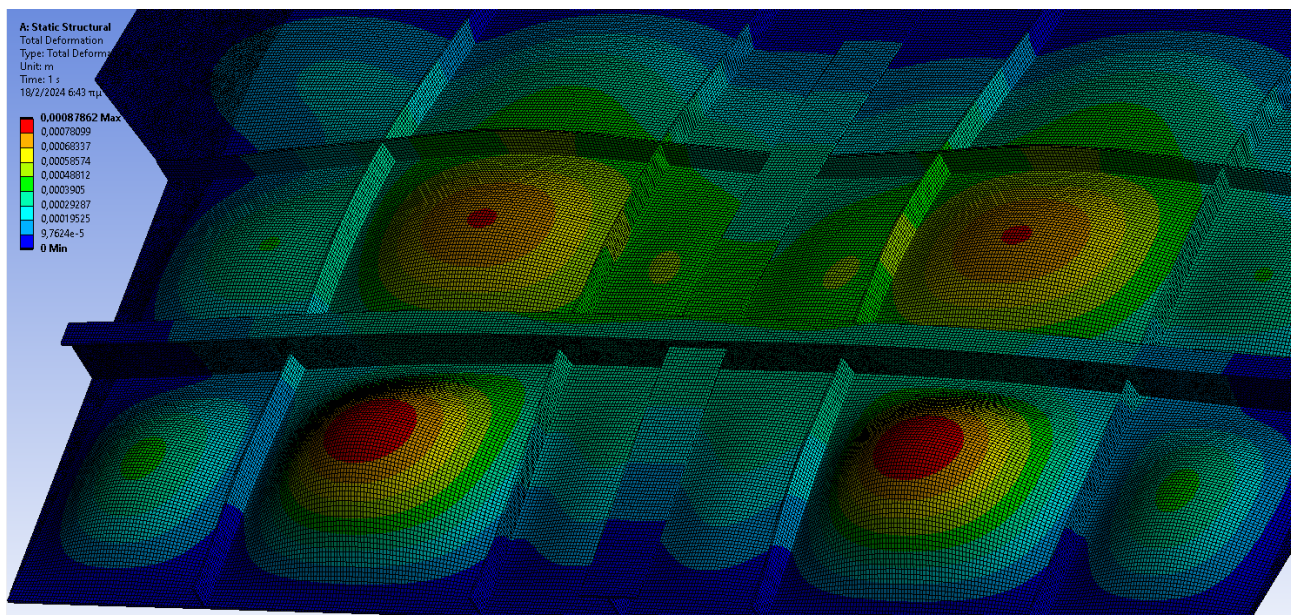


Εικόνα 87. Σημεία εμφάνισης μέγιστης τάσης Von-Mises για πλέγμα 30mm.

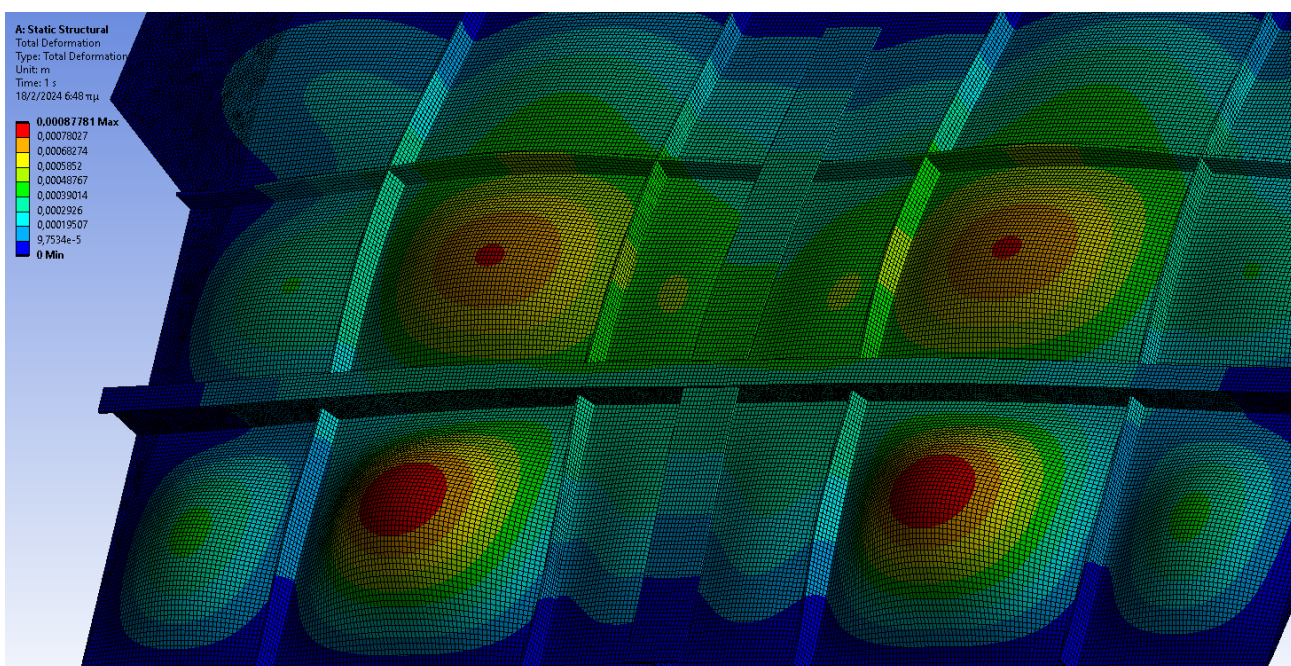
**B) Βέλος κάμψης και σημεία εμφάνισης μέγιστων τιμών.**

Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε πως σε όλες τις αναλύσεις με εξάεδρα στοιχεία (και για τετράεδρα στοιχεία), οι μεγαλύτερες τιμές του βέλους κάμψης εμφανίζονται εσωτερικά των επιφανειών που περικλύονται από ενισχυτικά. Τα αποτελέσματα αυτά είναι λογικά διότι οι μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης δεν θα μπορούσαν να εμφανίζονται πάνω στα ενισχυτικά ή σε κοντινή απόσταση αυτών λόγω ενίσχυσης του ελάσματος. Ακολουθούν σχετικές εικόνες.



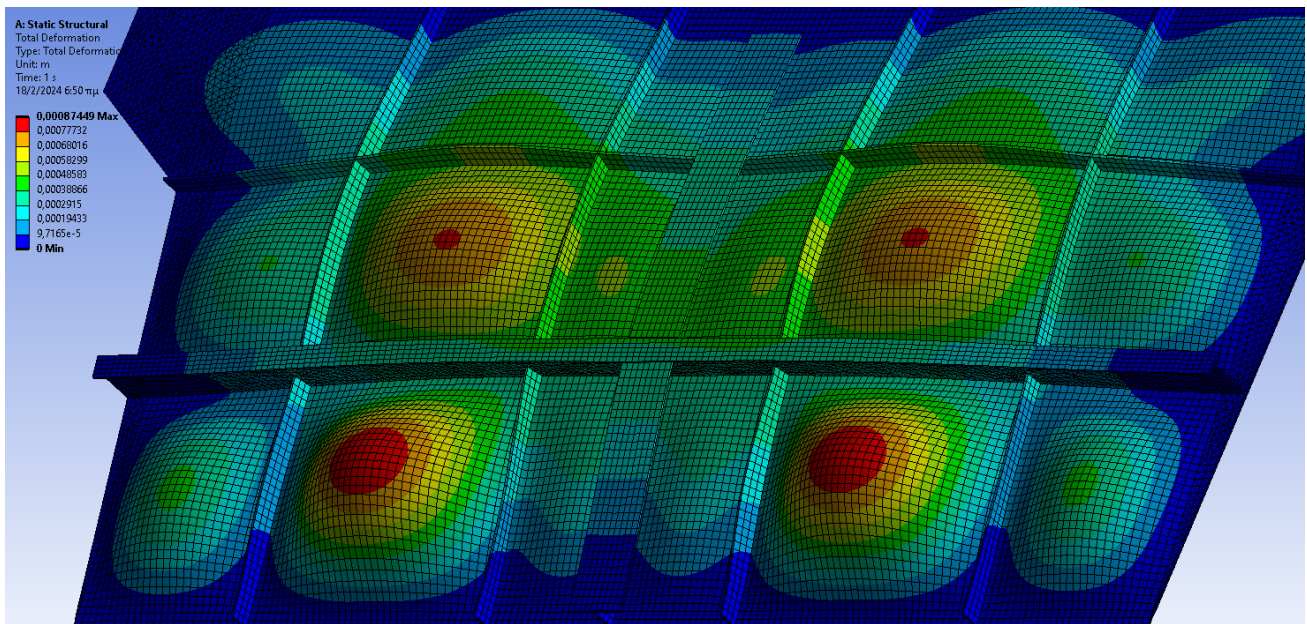


Εικόνα 88. Σημεία εμφάνισης μέγιστων τιμών βέλους κάμψης για πλέγμα 8mm.

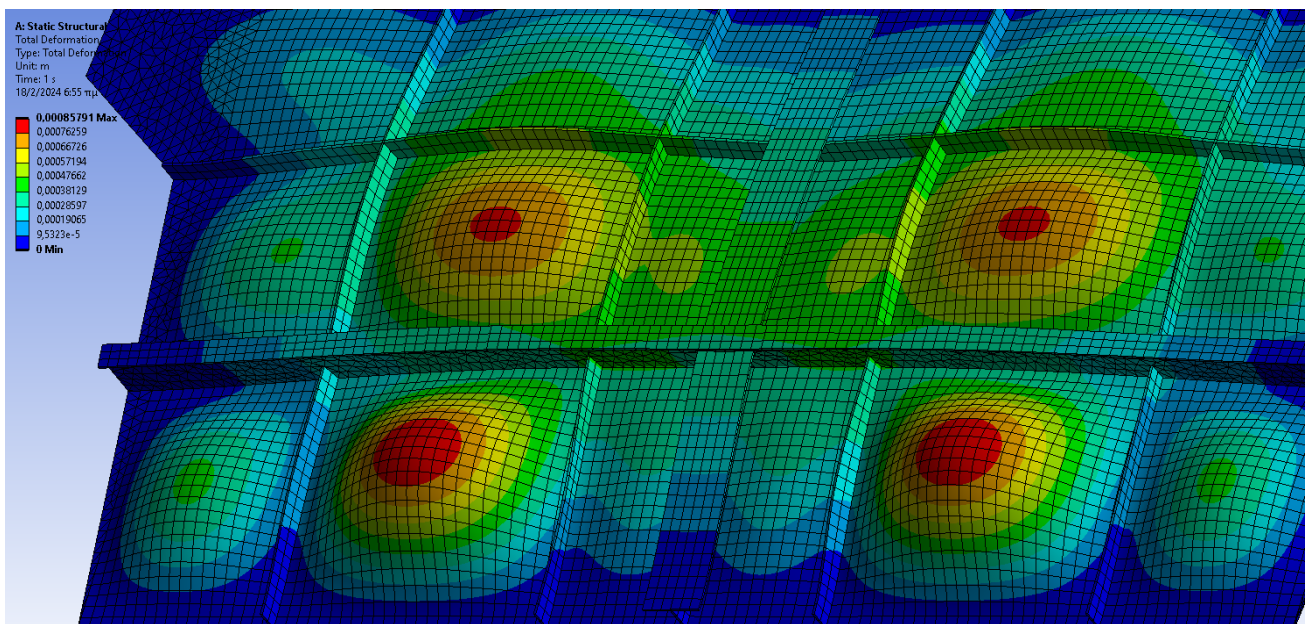


Εικόνα 89. Σημεία εμφάνισης μέγιστων τιμών βέλους κάμψης για πλέγμα 10mm.





Εικόνα 90. Σημεία εμφάνισης μέγιστων τιμών βέλους κάμψης για πλέγμα 20mm.



Εικόνα 91. Σημεία εμφάνισης μέγιστων τιμών βέλους κάμψης για πλέγμα 30mm.

Συμπερασματικά, όλες οι παραπάνω εικόνες μας οδηγούν στο να θεωρήσουμε ασφαλείς τις αναλύσεις και τα αποτελέσματα αυτών αφού δεν παρατηρείται καμία διαφοροποίηση ως προς το σημείο της μέγιστης καταπόνησης της φρακτής.

Τα αποτελέσματα όλων των αναλύσεων με εξαέδρα στοιχεία πλέγματος εμφανίζονται συγκεντρωτικά στον επόμενο πίνακα με τις δυσμενέστερες τιμές καταπόνησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4

ΕΙΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ( $w_{max}$ )	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ VON-MISES ( $\sigma_{max}$ )
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (30 mm) (Α)	0.858 mm	76.4 N/mm <sup>2</sup>
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (20 mm) (Β)	0.875 mm	81.4 N/mm <sup>2</sup>
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (10 mm) (Γ)	0.878 mm	92.8 N/mm <sup>2</sup>
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (8 mm) (Δ)	0.879 mm	98.2 N/mm <sup>2</sup>

Στα παραπάνω αποτελέσματα πρέπει να προστεθούν και αυτά της ανάλυσης με τετράεδρα στοιχεία, που αν και πρέπει να αποφεύγονται σύμφωνα με τους κανονισμούς, έχουν και αυτά ιδιαίτερο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον με τις τιμές να είναι  $\sigma = 87.8 \text{ N/mm}^2$  και  $w = 0.878 \text{ mm}$ . Παρατηρούμε πως υπάρχει μία μικρή απόκλιση στο βέλος κάμψης και μεγάλη απόκλιση στις τάσεις. Οι διαφορές θα ήταν μεγαλύτερες αν το πλέγμα δεν ήταν τόσο αναλυτικό.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, η πιο ακριβής λύση που αποδεχόμαστε ως σωστή είναι η ανάλυση της φρακτής με εξάεδρα στοιχεία πλέγματος και με μέγεθος στοιχείων 8 mm (περίπτωση Δ). Αυτό συμβαίνει διότι από την συγκεκριμένη ανάλυση παίρνουμε τα δυσμενέστερα αποτελέσματα. Έχουμε:

$$w_{\Delta_{max}} > w_{A_{max}} > w_{B_{max}} > w_{\Gamma_{max}} > w_{E_{max}}$$

$$\sigma_{\Delta_{max}} > \sigma_{A_{max}} > \sigma_{B_{max}} > \sigma_{\Gamma_{max}} > \sigma_{E_{max}}$$

Συμπεραίνουμε πως τα παραπάνω αποτελέσματα είναι λογικά διότι όσο μικραίνει το πλέγμα τόσο θα υπάρχει και πιο ακριβής λύση που προσεγγίζει το πραγματικό πρόβλημα. Αξίζει να αναφερθεί πως η ανάλυση με τα τετράεδρα στοιχεία 8 mm έχει απόκλιση από τα υπόλοιπα αποτελέσματα αφού δίνει το ίδιο βέλος κάμψης με την ανάλυση των 10 mm. Συνεπώς, οι κανονισμοί σωστά επισημαίνουν πως πρέπει να αποφεύγονται. Στην συνέχεια θα γίνει σύγκριση των αναλύσεων με εξάεδρα στοιχεία.

## 1) Ποιότητα στοιχείων πλέγματος

ΠΙΝΑΚΑΣ 5

ΕΙΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	ΠΟΙΟΤΗΤΑ
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (30 mm) (Α)	Μέτρια
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (20 mm) (Β)	Καλή
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (10 mm) (Γ)	Αρκετά καλή
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (8 mm) (Δ)	Πολύ καλή

Με βάση τα αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα πως όσο πιο μικρές είναι οι διαστάσεις των στοιχείων των πλευρών τόσο καλύτερη είναι και η ποιότητα αυτών. Επίσης, τα εξάεδρα στοιχεία είναι συμμετρικά και συνεπώς έχουν καλύτερη ποιότητα από τα τετράεδρα.

## **2) Αναλογίες πλευρών στοιχείων πλέγματος**

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως στα εξάεδρα στοιχεία, λόγω της συμμετρίας τους, έχουν αναλογίες πλευρών σχεδόν μονάδα.

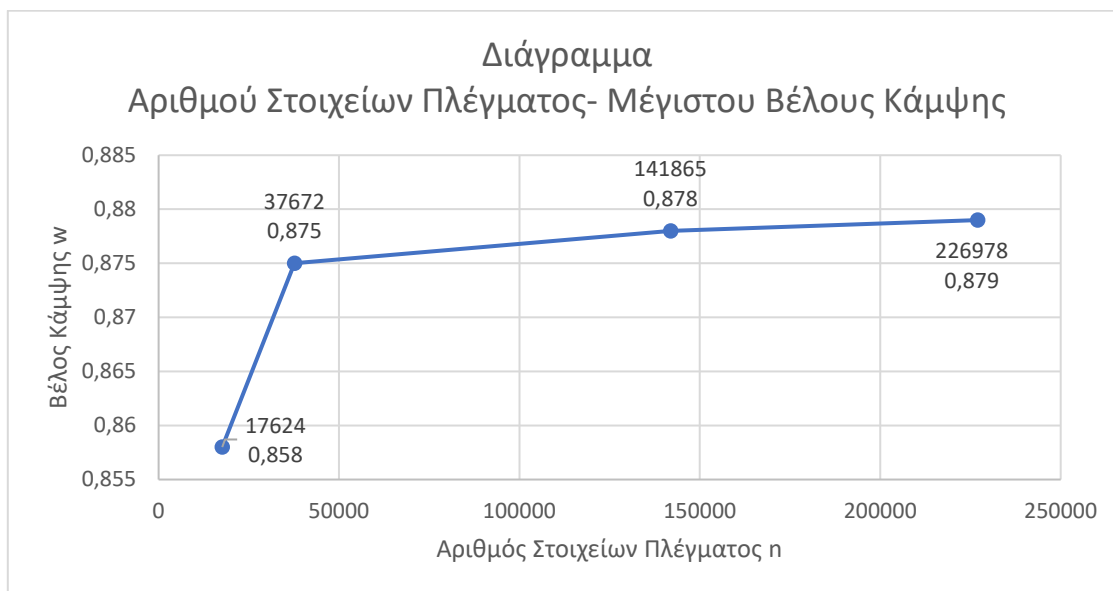
## **3) Στρεβλότητα στοιχείων πλέγματος**

ΠΙΝΑΚΑΣ 6

ΕΙΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	ΠΟΙΟΤΗΤΑ
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (30 mm) (Α)	Μέτρια
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (20 mm) (Β)	Καλή
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (10 mm) (Γ)	Αρκετά καλή
Ανάλυση με εξάεδρα στοιχεία (8 mm) (Δ)	Πολύ καλή

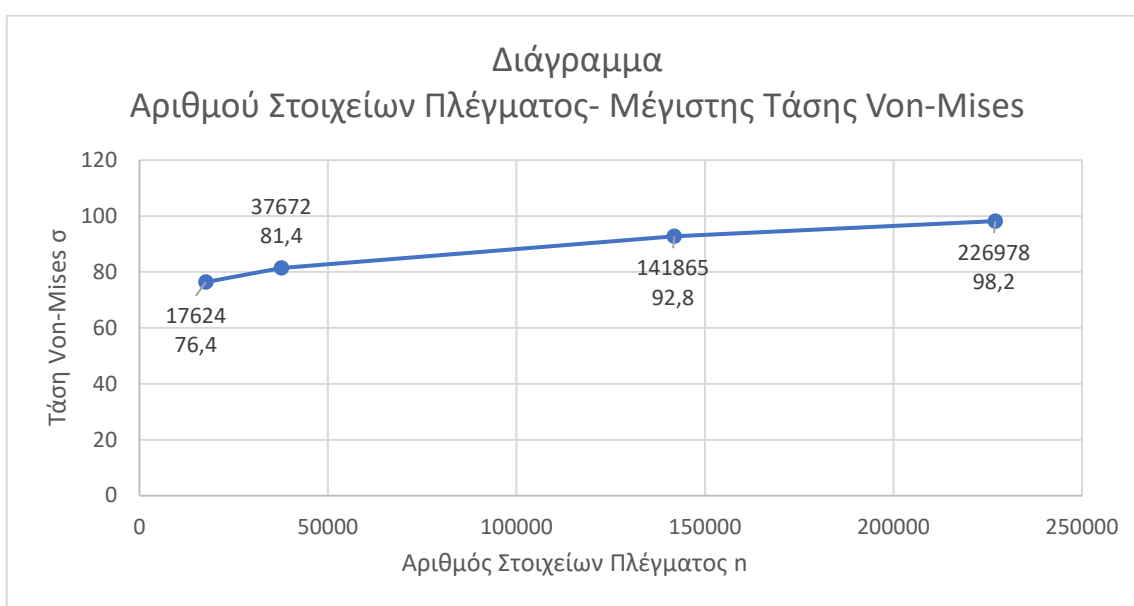
#### 4) Ολική παραμόρφωση

Οι τιμές του βέλους κάμψης για ανάλυση με εξαέδρα στοιχεία κυμαίνονται περίπου στα 0.85 με 0.88 mm σε όλη την μεταλλική επιφάνεια. Παρατηρούμε πως όσο μικραίνει το μέγεθος του πλέγματος τόσο η τιμή του βέλους κάμψης συγκλίνει προς το 0.9 mm. **Η απόκλιση της ελάχιστης τιμής από την μέγιστη είναι της τάξεως του 2.4%**. Οι τιμές σχηματίζουν το παρακάτω γράφημα.



#### 5) Μέγιστες τάσεις

Για τις τιμές των τάσεων παρατηρούμε και εδώ πως όσο μικραίνει το μέγεθος του πλέγματος τόσο η τιμή της τάσης θα συγκλίνει προς τα πάνω και σε μία τιμή περίπου  $100 \text{ N/mm}^2$ . Αυτό συμβαίνει διότι όσο μικρότερο είναι το στοιχείο του πλέγματος τόσο μεγαλύτερη θα είναι η συγκέντρωση τάσεων σε εκείνο. **Η απόκλιση της ελάχιστης τιμής από την μέγιστη είναι της τάξεως του 22.2%**. Οι τιμές σχηματίζουν το παρακάτω γράφημα.



## **Σύγκριση αποτελεσμάτων με τα όρια τάσεων του χάλυβα**

Η τάση διαρροής του χάλυβα δίνεται ως:

$$\sigma_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

Η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση Von-Mises στην φρακτή σύμφωνα με τις αναλύσεις είναι:

$$\sigma_{\max} = 98.2 \text{ N/mm}^2$$

Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το μοντέλο της φρακτής αντέχει την φόρτιση της υδροστατικής πίεσης για μέγιστο ύψος πλήρωσης με βάση το όριο διαρροής του υλικού το οποίο και δεν ξεπερνά. Δηλαδή:

$$\sigma_{\max} < \sigma_y$$

## **Σύγκριση αποτελεσμάτων με τα όρια τάσεων των κανονισμών του ABS**

Από τους κανονισμούς του ABS (3-2-20/9 και σελ.29 της διπλωματικής) και για στοιχεία πλέγματος με μέγεθος μικρότερο από το 1/10 της ισαπόστασης των ενισχυτικών, έχω ως μέγιστη επιτρεπόμενη τάση για στατικές φορτίσεις:

$$\sigma = 0.82 S_m F_y$$

Όπου,

$S_m = 1.0$  για mild steel

$F_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Άρα,

$$\sigma = 192.7 \text{ N/mm}^2$$

Από ανάλυση

$$\sigma_{\max} = 98.2 \text{ N/mm}^2$$

Συμπεραίνουμε πως και αυτό το κριτήριο πληρείται με βάση τα αποτελέσματα που πήραμε από το λογισμικό. Συνεπώς, το μοντέλο της φρακτής βρίσκεται μέσα στα πλαίσια αντοχής των κανονισμών.

$$\sigma_{\max} < \sigma$$

## **Σύγκριση αποτελεσμάτων με την μελέτη αντοχής μέσω διαγραμμάτων**

Η σωστή σύγκριση και για να διαπιστώσουμε την εγκυρότητα της μεθοδολογίας των διαγραμμάτων του Schade, γίνεται χρησιμοποιώντας το βέλος κάμψης.

Από Schade:

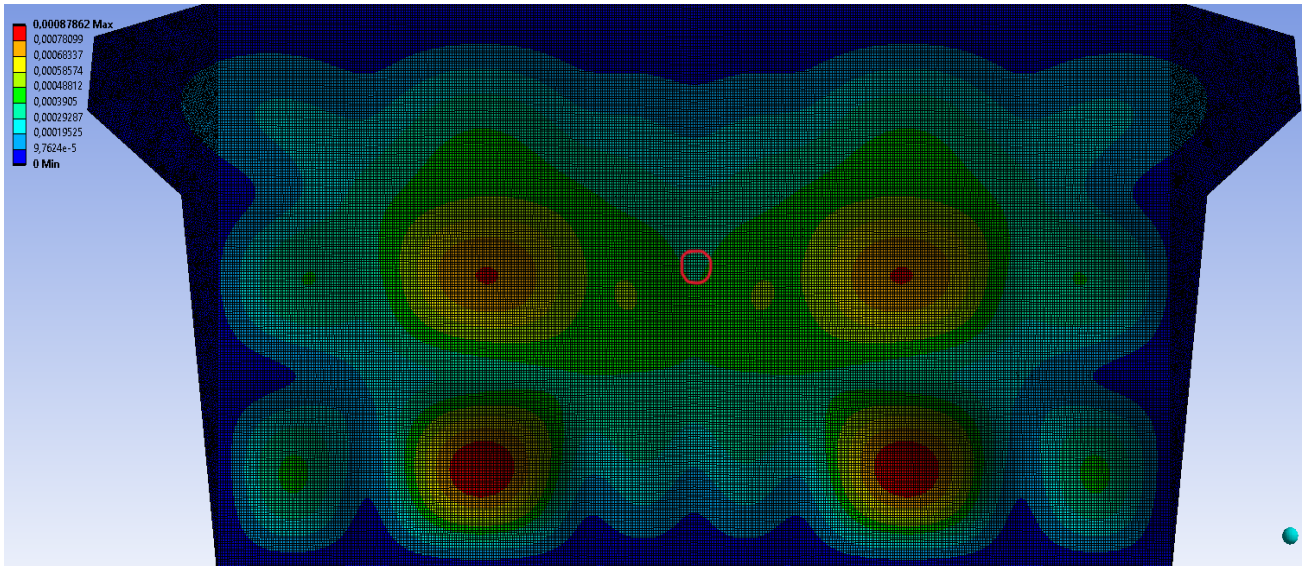
$$w = 0.24 \text{ mm}$$

στο κέντρο του ελάσματος.

Από ANSYS και ανάλυση με 8mm πλέγμα έχω:

$$w \approx 0.35 \text{ mm}$$

Η παραπάνω τιμή προσεγγίζει κάπως τα δεδομένα από το λογισμικό, όχι όμως με απόλυτη ακρίβεια.



Εικόνα 92. Σημείο εμφάνισης βέλους κάμψης στο κέντρο του ελάσματος για πλέγμα 8mm.



## 4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας έγινε σχεδιασμός και μελέτη του μοντέλου της πρωραίας υδατοστεγούς φρακτής συγκρούσεως κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) και με βάση τους κανονισμούς του Αμερικανικού Νηογνώμονα ABS, οι οποίοι υπάγονται στους κανονισμούς του IACS (Common Structural Rules). Μελετήθηκε αναλυτικά και με τρεις διαφορετικούς τρόπους η κάμψη του μοντέλου της φρακτής υπό ασκούμενη υδροστατική πίεση και αποτυπώθηκαν τα αποτελέσματα σε πίνακες. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν μεταξύ τους, με αυτά που υπολογίστηκαν από κανονισμό, με τα όρια του υλικού και με την μελέτη αντοχής μέσω διαγραμμάτων.

Από την μελέτη που πραγματοποιήθηκε και με βάση τα αποτελέσματα, η πρωραία φρακτή συγκρούσεως ικανοποιεί τις απαιτήσεις των κανονισμών και δεν ξεπερνά τα ανώτατα όρια αντοχής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι επιλεγμένες διαστάσεις και τα ενισχυτικά της φρακτής αντέχουν περίπου δύομιση (2.5) φορές παραπάνω φορτίο από αυτό που του ασκήθηκε. Συνεπώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως ο συντελεστής ασφαλείας για την κατασκευή είναι 2.5.

Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνουν τον αληθινό σκοπό των κανονισμών οι οποίοι είναι πιο αυστηροί ως προς την διαστασιολόγηση και επιλογή της ενίσχυσης, και ειδικότερα της πρωραίας φρακτής συγκρούσεως, η οποία είναι το πρώτο κατασκευαστικό στοιχείο που θα κληθεί να αντέξει σε περίπτωση κατάκλυσης του πρωραίου διαμερίσματος.

Συγκεκριμένα, από την μελέτη του μοντέλου στο λογισμικό του ANSYS, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

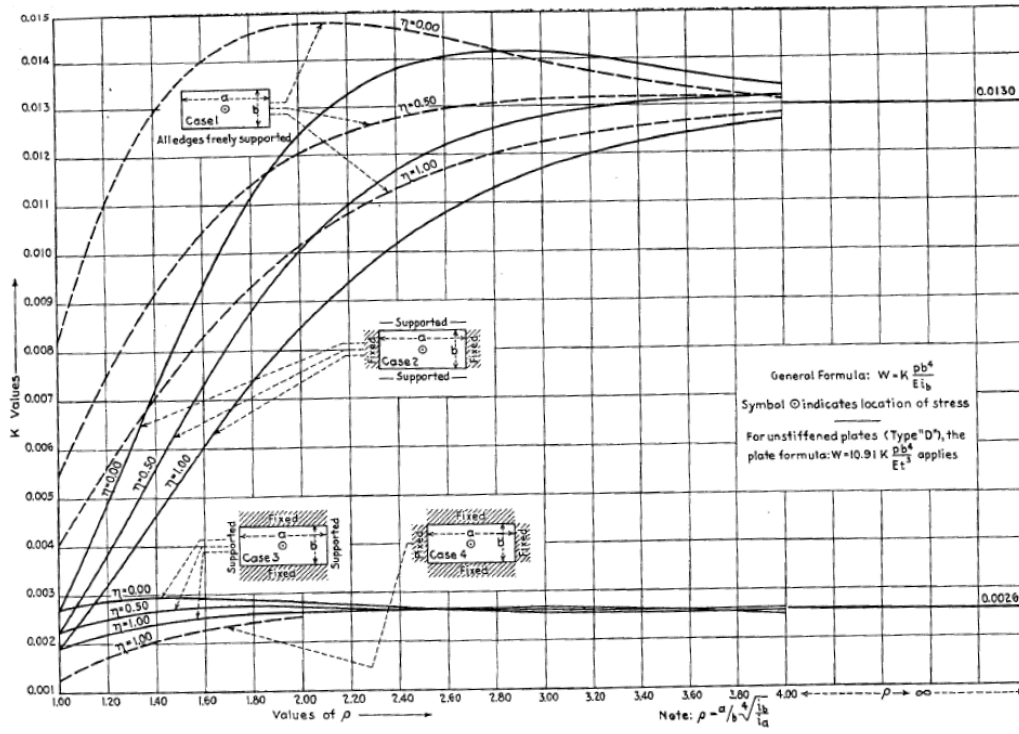
1. Η επιλογή των κατάλληλων κατασκευαστικών ενισχύσεων θα πρέπει να γίνεται αυστηρά με βάση τους κανονισμούς του εκάστοτε Νηογνώμονα, έτσι ώστε να μην υπάρχουν λανθασμένα αποτελέσματα στο κατασκευαστικό μοντέλο και στις καταπονήσεις που δέχεται.
2. Η ποιότητα του πλέγματος εξαρτάται από την γεωμετρία των στοιχείων και τις διαστάσεις των πλευρών αυτών. Τα εξάεδρα στοιχεία είναι προτιμότερα από τα τετράεδρα και αυτό αποτυπώνεται στα αποτελέσματα. Το ίδιο ισχύει για την αναλογία των πλευρών και την στρέβλωσή τους.
3. Το βέλος κάμψης δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την μορφή και διάσταση του πλέγματος, γεγονός που μας οδηγεί σε ασφαλή συμπεράσματα όσον αφορά την καταπόνηση της κατασκευής. Η απόκλιση μεταξύ των τιμών είναι πολύ μικρή (2.4%), συνεπώς οι αναλύσεις είναι έγκυρες.
4. Τα αποτελέσματα των τάσεων δείχνουν μεγάλες αποκλίσεις όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες τάσεις στο μοντέλο, όμως δεν υπάρχουν περιοχές που υπερβαίνουν το όριο των 235 MPa. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως από 30 mm μέγεθος πλέγματος σε 8 mm, οι τάσεις άλλαξαν κατά 22.2% λόγω του φαινομένου της συγκέντρωσης. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως για την εύρεση των τάσεων θα πρέπει να γίνει λεπτομερέστατη ανάλυση του μοντέλου και να υπάρχει μια επαναληπτική διαδικασία ελέγχου των αποτελεσμάτων και σύγκριση αυτών με τους κανονισμούς.
5. Το λογισμικό ANSYS είναι το καλύτερο πρόγραμμα εφαρμογής της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων που κυκλοφορεί στην αγορά. Οι δυνατότητες του είναι πολλαπλές διότι αφενός επιλύει δύσκολες γεωμετρίες και αφετέρου δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργεί κατάλληλα πλέγματα ανάλογα με το πρόβλημα και πάντα με ακριβή αποτελέσματα.



## Δ. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Χριστόφορος Γ. Προβατίδης, “Πεπερασμένα Στοιχεία στην Ανάλυση Κατασκευών”, 2<sup>η</sup> έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, 2017.
2. Γεώργιος Ε. Σταυρουλάκης, “Υπολογιστική Μηχανική”, ΣΕΑΒ, 2015.
3. ANSYS Guide: Fundamental FEA Concepts and Applications, ANSYS Inc.
4. Training Manual: Rhinoceros modeling tools for designers – Level 1, Robert McNeel & Associates, 2020
5. Δρ. Δημήτριος Δραγατογιάννης, Σημειώσεις Μαθήματος ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών, ΠΑΔΑ.
6. Δρ. Αλέξανδρος Θεοδουλίδης, Σημειώσεις Μαθήματος ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών, ΠΑΔΑ.
7. Γεώργιος Χατζηκωνσταντής, Σημειώσεις Μαθήματος ΝΑΥΠΗΓΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών, ΠΑΔΑ.
8. Δρ. Αλέξανδρος Θεοδουλίδης, Σημειώσεις Μαθήματος ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΩΝ, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών, ΠΑΔΑ.
9. Δρ. Δημήτριος Δραγατογιάννης, Σημειώσεις Μαθήματος ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΙΙ, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανικών, ΠΑΔΑ.
10. <https://ww2.eagle.org/en/rules-and-resources/rules-and-guides.html#/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/1-rules-building-classing-marine-vessels-2023>

## Ε. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Εικόνα 93. Διάγραμμα Schade - Μετατόπιση στο κέντρο του ελάσματος.